

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

Université BLIDA 1

Faculté de technologie



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

En : Génie mécanique

Spécialité : Génie des Matériaux

Thème

**L'INFLUENCE DES REPARATIONS SUCCESSIVES SUR LES
PROPRIETES METALLURGIQUES ET MECANQUES DE L'ACIER
X60 ET X70 POUR PIPES**

Présentée Par :

AMRICHE ABDEL HAKIM ANIS

L'établissement de formation : ALPHAPIPE – GHARDAIA

Dirigé par :

Mme Hamedi Naima

Co – encadrant : Mr Mouici Derradji

2024/2025

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à madame Hamedi Naima, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, sa patience et son accompagnement tout au long de ce travail.

Je remercie également l'ensemble des enseignants et personnels de département mécanique, qui ont contribué à ma formation académique et professionnelle au cours de ces dernières années.

Mes remerciements vont aussi au personnel de l'entreprise ALPHAPIPE, en particulier Mr Mouici Derradji pour m'avoir accueilli(e) dans le cadre de mon stage et pour m'avoir offert un environnement de travail enrichissant, ainsi que l'accès aux moyens nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Je n'oublie pas mes collègues et camarades, pour leur soutien, leur esprit d'équipe et les échanges constructifs partagés.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille et mes proches, pour leur soutien moral constant, leur compréhension et leur encouragement indéfectible.



DEDICACES

Je dédie ce travail :

À mes parents, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inconditionnel tout au long de ma vie.

À ma famille, qui a toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles.

À mes enseignants, pour leur dévouement et leur transmission du savoir avec passion.

À mes amis et camarades, pour leur aide précieuse, leur bienveillance et les moments partagés.

À mes jaloux Merci pour Votre doute a nourri ma détermination. Votre scepticisme a renforcé ma volonté.

Et vos critiques ont été le carburant de ma réussite.

Et enfin, à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.



RESUME

Les tubes en acier des nuances X60 et X70 sont des matériaux essentiels dans l'industrie des pipelines de pétrole et de gaz, en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur grande résistance aux contraintes et à la corrosion. Toutefois, lorsque ces tubes sont soumis à des réparations successives (comme le soudage, les traitements thermiques ou le formage à froid), leurs propriétés métallurgiques et mécaniques peuvent être affectées négativement.

Cette étude vise à analyser l'effet des réparations répétées sur :

1. La microstructure : modifications des grains métalliques et de la distribution des phases.
2. Les propriétés mécaniques : dureté, résistance à la traction, résilience (résistance aux chocs) et ténacité à la fatigue.
3. La résistance à la corrosion : effet des contraintes résiduelles sur la corrosion et la fissuration.

ABSTRACT

X60 and X70 grade steel pipes are essential materials in the oil and gas pipeline industry due to their excellent mechanical properties and high resistance to stress and corrosion. However, subjecting these pipes to successive repairs (such as welding, heat treatment, or cold forming) may negatively affect their metallurgical and mechanical properties.

This study aims to analyze the effect of repeated repairs on:

1. Microstructure: Changes in mineral grains and phase distribution.
2. Mechanical properties: Hardness, tensile strength, impact resistance, and fatigue toughness.
3. Corrosion resistance: The effect of residual stresses on corrosion and cracking.

ملخص

تعد أنابيب الفولاذ من الدرجات X60 و X70 من المواد الأساسية في صناعة الانابيب النفط والغاز بسبب خصائصها الميكانيكية الممتازة ومقاومتها العالية للضغوط والتآكل. ومع ذلك، فإن تعرض هذه الأنابيب لإصلاحات متتالية (مثل اللحام، المعالجة الحرارية، أو التشكيل البارد) قد يؤثر سلبًا على خصائصها المعدنية والميكانيكية .

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير الإصلاحات المتكررة على :

1. البنية المجهرية: تغيرات في الحبيبات المعدنية وتوزيع الطور .
2. الخصائص الميكانيكية : صلادة، قوة الشد، مقاومة الصدمات، ومثانة التعب .
3. مقاومة التآكل : تأثير الإجهادات المتبقية على التآكل والتشقق.

Sommaire

Historique de l'Entreprise	1
Objectifs visés par le projet :	4
Caractéristique du produit et gamme de fabrication :	4
Le Contrôle de la qualité :	5
La Qualification d'un mode opératoire :	5
Il s'agit de vérifier que le mode opératoire choisi convient en fonction.....	5
Rôle de bureau technique :	5
Atelier de production :	7
II.5.2 L'atelier de production est constitué de :	7
Système de stockage :	8
II Chapitre :	25
II 1 Généralité sur les aciers.....	25
Généralités sur le soudage :	30
Introduction :	30
Procédés de soudage :	31
Le soudage avec électrodes enrobées (SMAW) :	31
II.5.5 Définitions du soudage à l'arc (électrode enrobée).....	32
II.5.5 . L'arc électrique	33
II.5.5 Installation de soudage à l'électrode enrobée	33
II.5.5 Amorçage en soudage à l'arc et stabilité de l'arc électrique.....	33
II.5.5 . Influence de l'intensité de courant en soudage à l'arc avec électrode enrobée [9]..	34
II.5.5 . Nature du courant de soudage et polarité en soudage à l'arc	34
II.5.5 Choix du courant de soudage et de la polarité en fonction des matériaux soudés.	35
II.5.5 . Les sources de courant Caractéristiques du transformateur de soudage.	35
Soudage à l'arc électrique sous flux (SAW)	36
II.5.5 Définition du procédé :	36
Domaines d'applications [9] :	39
Les flux et leurs rôles [9] :	39
II.8.1. Classification des fils et flux [9].....	39
Soudage	42
Technique de soudage [9].....	42
Consommation en fil et flux [9]	42

Taux de fusion des fils [9].....	43
Variantes de soudage sous flux	44
II.5.5 Soudage avec fil toronné (Fig 32a)	44
II.5.5 Soudage sous fil-fourré (Fig 32b et 32d)	44
II.5.5 Soudage sous flux magnétique (Fig 32c).....	44
II.5.5 Avantages et inconvénients du procédé	45
Avantage :	45
Inconvénients :	46
Les électrodes :.....	46
Protection de métal en fusion :	46
Apport d'élément:	46
Types d'électrodes :	47
Le fil de soudure et le flux	48
Le fil de soudure.....	48
Caractéristiques mécaniques du fil de soudage (SAW)	48
Conclusion :.....	48
Le flux :	49
Analyse chimique du flux	49
La soudabilité	50
Définition : [9].....	50
II.5.5 Soudabilité métallurgique : [9]	50
II.5.5 La zone fondue :.....	50
II.5.5 Le métal de base :.....	50
II.5.5 La soudabilité de certain alliage :.....	52
II.5.5 Influence des éléments d'addition et des impuretés : [9].....	52
II.5.5 Eléments d'addition (principaux) : [9].....	52
Recherche du carbone équivalent (Ceq).....	53
II.5.5 Définition du Carbone Équivalent (Ceq)	53
II.5.5 Formule classique du Ceq (norme IIW – International Institute of Welding)	53
II.5.5 Rôle et importance du Ceq :.....	54
II.5.5 Interprétation des valeurs de Ceq :.....	54
II.5.5 Méthode de l' IIS :	54
II.5.5 Méthode BVRA :	56
Le diagramme de Schaeffler (Fig 41A) permet :	56
II.5.5 But de la formule :.....	58

II.5.5	Différence entre C_{eq} et C_{eqc} :	58
II.5.5	Définition du CE_{pcm} :	58
II.5.5	Formule du CE_{pcm} (selon Nippon Steel) :	59
II.5.5	Utilisation du CE_{pcm} :	59
II.5.5	Interprétation des valeurs de CE_{pcm} :	59
II.5.5	Comparaison C_{eq} vs CE_{pcm} :	59
II.5.5	Données de composition (maximales d'après API 5L PSL2)	61
II.5.5	Méthode IIW (C_{eq} IIW) :	61
II.5.5	Méthode CE_{pcm} (PCM – Nippon Steel) :	61
II.5.5	Méthode BWRA (via Carbon Equivalent de Breadstreet) :	62
II.5.5	Résumé des résultats :	62
	La soudabilité globale ou constructive : [9]	62
	La soudabilité opératoire ou relative : [9]	62
	Les impuretés : [9].....	63
	Soudage des aciers à faible teneur en carbone :	63
II.5.5	Introduction	63
II.5.5	Les différentes zones d'un assemblage soudé :	63
	-3.Les défauts des soudages :	65
II.5.5	Introduction :	65
II.5.5	Les fissures :	65
II.5.5	Orientation des fissures :	65
II.5.5	Les fissures longitudinales :	65
II.5.5	Les fissures transversales :	66
II.5.5	Fissures de Gorge (Throat Cracks) :	67
II.5.5	Fissures de Racine :	67
II.5.5	Fissures de Cratère :	67
II.5.5	Fissures au raccordement :	68
II.5.5	Fissures Sous – Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement) :	68
II.5.5	Fissure à chaud (ou de solidification) :	69
II.5.5	Fissures à froid (fissures d'hydrogène) :	70
II.5.5	Fissuration lamellaire (ou l'arrachement lamellaire) :	71
II.5.5	Les défauts de soudage :	72
	Méthodes d'identification des défauts :	73
II.5.5	Généralités sur le contrôle non destructif :	73
II.5.5	Mise en œil des contrôles non destructifs :	73

II.5.5	Principaux contrôles non destructifs :	74
	Acceptabilité :	74
	Conclusion :	76
	Caractérisation mécanique des soudures réparées :	76
III.5.5	Analyse chimique – Tubes API 5L X60M PSL2 :	76
	Tableau récapitulatif (X60M) :	76
	Élément Carbone (C).....	77
	Éléments d’alliage (Mn, Si, Nb, V, Ti)	77
	Impuretés (P, S).....	77
	Indice CEpcm (Carbone Équivalent - méthode Nippon Steel)	77
	Conclusion.....	77
	Il compare :.....	78
III.5.5	Analyse chimique – Tubes API 5L X70M PSL2.....	80
	Tableau récapitulatif (X70M)	80
-	Conclusion	81
	Il compare :.....	81
III.5.5	L’Essai dureté :	82
	Interprétation :	85
III.5.5	Essais de Dureté HV10 (N/mm2)	86
-	Analyse qualitative par tube :	86
-	Analyse qualitative par tube :	90
-	Interprétation :	92
III.5.5	Essais de traction/Pliage pour les aciers X60M et X70M.....	94
III.2.6.1	Résultats des Essais de Traction et.....	94
-	Analyse des 5 courbes :	95
-	Analyse Technique des Résultats Mécaniques :.....	95
-	Analyse et interprétation Globale :.....	97
-	Analyse des Courbes de Traction des 5 Tubes :.....	97
-	Conclusion : Tous les échantillons sont conformes à la norme API 5L X60 PSL2. .	98
-	Analyse des 5 courbes:	99
-	Analyse technique :	99
-	Observations techniques des 5 tubes :	100
-	Analyse Globale :	101
	<i>Essais de pliage :</i>	101
	Conclusion :.....	101

III.5.5	L'Essai de résilience :	101
-	Interprétation :	103
-	Interprétation :	103
-	Interprétation :	104
-	Résumé global par zone :	104
-	Interprétation et comparatif des résultats :	105
-	Profils de charge par tube :	105
-	Écarts entre zones :	105
-	Tendance générale par tube :	105
-	La Soudure :	107
-	Résumé comparatif – Comportement mécanique des tubes :	108
-	Profils de charge des différents tubes :	108
-	Écarts entre zones :	108
III.5.5	Hypothèses pour la simulation (typique des essais de résilience des aciers type API 5L X70M/X60M) :	110
-	Interprétation générale par zone (tous tubes)	110
-	Interprétation des courbes :	110
	Le Test DWTT (Drop Weight Tear Test):	111
III.5.5	Essais DWTT (Drop Weight Tear Test) à -10 °C pour les tubes en acier X60M PSL2 SAWH :	111
-	Conclusion :	112
-	Résumé des résultats :	112
-	Interprétation technique :	112
	Conformité normative :	112
-	Conclusion : Les essais DWTT à -10 °C confirment :	112
	COMPARAISON GLOBALE DES ESSAIS MÉCANIQUES :	113
	. SYNTHÈSE PAR CRITÈRE :	114
-	CONCLUSION	114
	. CONCLUSION FINALE :	116
-	Comportement métallurgique :	116
-	Comportement mécanique :	116
-	Synthèse et implications :	116

LISTE DES FIGURES

Figure 1 QUALIFICATIONS	1
Figure 2 CERTIFICATE OF REGISTRATION.....	2
Figure 3 CERTIFICATE OF REGISTRATION.....	2
Figure 4 LA STAFF ET LES DIVISIONS FONCTIONNELLES	3
Figure 5 Micrographie [01]	26
Figure 6 ESSAI DE "TRACTION" [01]	27
Figure 7 Essai De Dureté [01].....	28
Figure 8 Pliage	29
Figure 9 Résilience Des Matériaux [01]	29
Figure 10 PLAN DE PLANIFICATIONS	6
Figure 11 Les bobines en acier [01]	30
Figure 12 La réparation des bandes [01]	31
Figure 13 Machine à couper début de bande [01]	32
Figure 14 Tube préparé à la machine à souder en spirale	33
Figure 15 Contrôle visuel : [01]	35
Figure 16 Radioscopie (rayon X) :[01]	36
Figure 17 Détection du dédoubleur (laminassions internes) : [01]	38
Figure 18 Contrôle radiographique : [01]	40
Figure 19 Schéma soudage à l'électrode [9]	31
Figure 20 Soudeur à l'électrode enrobée [09].....	32
Figure 21 schéma de l'électrode [9]	32
Figure 22 Image de l'arc électrique [9]	33
Figure 23 : Soudeur à l'arc [9]	36
Figure 24 : Schéma du soudage sous flux [9]	37
Figure 25 : Schéma du soudage sous flux [9]	37
Figure 26 : Soudage sous flux [9]	39
Figure 27 Classification pour les fils-électrodes et couples fils/flux suivant EN 746	41
Figure 28 Classification suivant EN 760.....	41
Figure 29 : Volume métal d'apport [9]	42
Figure 30 : Taux fusion soudage sous flux [9].....	43
Figure 31 : Métal déposé [9]	43
Figure 32 : Différents modes de soudage sous flux [9].....	45
Figure 33: Photo du soudage sous flux [9].....	45
Figure 34 : Électrodes de soudage [10]	47
Figure 35 : Le fil de soudure [1]	49
Figure 36 : Le flux [1]	49
Figure 37 : soudures et zones [9]	51
Figure 38 : Macro et grains acier [9].....	51
Figure 39 : Formule carbone équivalent	54
Figure 40 : Formule carbone équivalent	56
Figure 41:Schaeffer [9]	56
Figure 42 : Formule température de préchauffage	57
Figure 43 : Diagramme de Sférian [9].....	60
Figure 44: Les différentes zones d'un assemblage soudé.....	64

Figure 45: La fissure longitudinale.	65
Figure 46: La fissure transversale.	66
Figure 47: Les types de fissure.....	66
Figure 48: Fissure de Gorge (Throat Cracks).....	67
Figure 49:Fissure de Racine.	67
Figure 50:fissure de cratère	67
Figure 51: Fissure au raccordement	68
Figure 52: Fissures Sous –Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).....	68
Figure 53: Fissures Sous –Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).....	69
Figure 54: Évolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement	70
Figure 55: Fissure à froid (fissure d'hydrogène).....	70
Figure 56: Arrachement lamellaire dans un joint en T.....	71
Figure 57: Séquences de la procédure de réparation [9].	72
Figure 58:Film radiographique de la soudure initiale.	73
Figure 59:Meulage d'un cordon de soudure	74
Figure 60:Rechargement du cordon de soudure.....	74
Figure 61: Radiographie de la première réparation R1.	75
Figure 62:Radiographie de la deuxième réparation R2.....	75
Figure 63:profil chimique.....	78
Figure 64: le graphique à barres montrant la répartition des principaux éléments chimiques pour chaque tube X60M.....	79
Figure 65:profil chimique.....	81
Figure 66:le graphique à barres montrant la répartition des principaux éléments chimiques pour chaque tube X70M.	82
Figure 68:Échantillons après polissage	83
Figure 67:Machine de polissage.....	83
Figure 69 : Papier abrasif	83
Figure 70: échantillon après attaque chimique.....	83
Figure 71: Attaque chimique.....	84
Figure 72: Machine de dureté.....	84
Figure 73:Éprouvettes avec joint de soudure bout à bout pour la dureté Vickers (Acier X 60M).....	85
Figure 74:La courbe d'homogénéité de dureté HV10 pour les cinq tubes	88
Figure 75:La courbe d'homogénéité de dureté HV10 pour les cinq tubes	93
Figure 76: courbe de traction X60.....	95
Figure 77: d'éprouvette de traction (Normalisée)	96
Figure 78: courbe de traction X70.....	98
Figure 79: Métal de base	
Figure 80:Zone de soudure.....	102
Figure 81: courbe Force-Déplacement	106
Figure 82: courbe Force-Déplacement	109
Figure 83: Graphique à barres comparatif des propriétés mécaniques moyennes entre les aciers X60M et X70M.....	115

Introduction Générale

Les pipelines constituent un maillon essentiel dans le transport des hydrocarbures et des fluides industriels sur de longues distances. Pour répondre aux exigences croissantes de performance et de sécurité, l'industrie utilise principalement des aciers haute résistance de grades API 5L X60 et X70. Ces matériaux offrent un excellent compromis entre résistance mécanique, ténacité et soudabilité, tout en garantissant une bonne résistance aux sollicitations environnementales.

Le soudage est une opération par laquelle on établit la continuité entre les parties à assembler, avec ou sans métal d'apport, en utilisant des procédés appropriés.

Le choix du procédé de soudage repose généralement sur deux critères : les limitations techniques et le coût. Les limitations techniques peuvent être inhérentes au type de matériaux au type de joint, à la disposition de soudage

Les deux procédés étudiés dans cette étude sont :

- Le SAW : qui est un procédé utilisé par l'usine Alpha pipe pour la fabrication des tubes (gazoducs et hydrauliques) en chaîne, le plus demandé par les cahiers des charges.
- Le SMAW (soudage à l'arc avec électrode enrobée)

Cependant, lors de leur fabrication, installation ou maintenance, ces pipelines peuvent nécessiter des interventions de réparation successives. Ces opérations, qui incluent typiquement des reprises de soudage, des meulages localisés ou des traitements thermiques correctifs engendrent des sollicitations thermomécaniques répétées sur le matériau. Chaque intervention modifie localement la microstructure métallurgique, particulièrement dans la zone affectée thermiquement (ZAT), avec des conséquences potentielles sur :

- La stabilité microstructurale (évolution des phases constitutives).
- Les caractéristiques mécaniques (résistance, ductilité, ténacité).
- Le comportement en service (résistance à la corrosion, à la fatigue).

Les aciers X60 et X70 présentent des sensibilités différentes à ces sollicitations répétées. Alors que le X70 montre généralement une meilleure stabilité microstructurale grâce à sa composition chimique optimisée et son traitement thermomécanique contrôlé, le X60 peut développer plus rapidement des zones fragilisées après plusieurs interventions.

Cette problématique revêt une importance capitale pour l'intégrité à long terme des infrastructures pipelinières. Une compréhension approfondie des phénomènes métallurgiques induits par les réparations multiples permet d'optimiser les procédures d'intervention et de définir des limites d'acceptabilité pour le nombre et l'étendue des réparations autorisées.

L'étude de ces effets s'inscrit dans le cadre plus large de l'ingénierie des matériaux pour applications critiques, où la maîtrise des paramètres microstructuraux conditionne directement la performance et la fiabilité des installations industrielles. Elle s'appuie sur des techniques d'analyse avancées (microscopie électronique, diffraction des rayons X) couplées à des essais mécaniques standardisés (traction, résilience, dureté).

L'enjeu industriel est de taille : établir le juste équilibre entre nécessité de maintenance et préservation des propriétés initiales du matériau, tout en respectant les normes de sécurité les plus strictes (API, ASME, DNV). Cette introduction générale pose le cadre d'une réflexion qui sera développée autour des aspects métallurgiques, mécaniques et normatifs liés aux réparations successives sur pipelines.

Notre travail consiste à étudier les l'effet des réparations multiples sur la qualité du joint soudé. En se focalisant essentiellement sur la qualité de la Soudure, les défauts engendrés et en particulier les Caractéristiques mécaniques (dureté, Résistance, Résilience, composition chimique), les perspectives seraient de faire une étude complémentaire sur l'aspect résistance à la corrosion de ces aciers traités.

**Présentation de l'unité
ALFA PIPE-Ghardaïa**

II Chapitre I

Historique de l'Entreprise

Ne pouvant pas satisfaire les commandes de SONARTRACH en matière de transport et hydrocarbures .Il a été décidé de créer une 2^{ème} unité similaire.

La mise en chantier de l'unité a démarré en Avril 1974 par une société allemande, et entrée en production en 1977 d'une capacité de 120.000 tonnes annuelle d'une équivalence de 375KM de tube de 42 Pouces de diamètre. Les bobines sont transportées par voie ferrée de Annaba à Touggourt ou elles sont stockées dans un dépôt d'une capacité de 40.000 tonnes, pour être transportées par camion SNTR jusqu'à l'unité de GHARDAIA (à 350Km).



Figure 1 : Les qualifications de l'entreprise



Figure 2 : Le Certificat de la Spécification ISO/TS29001

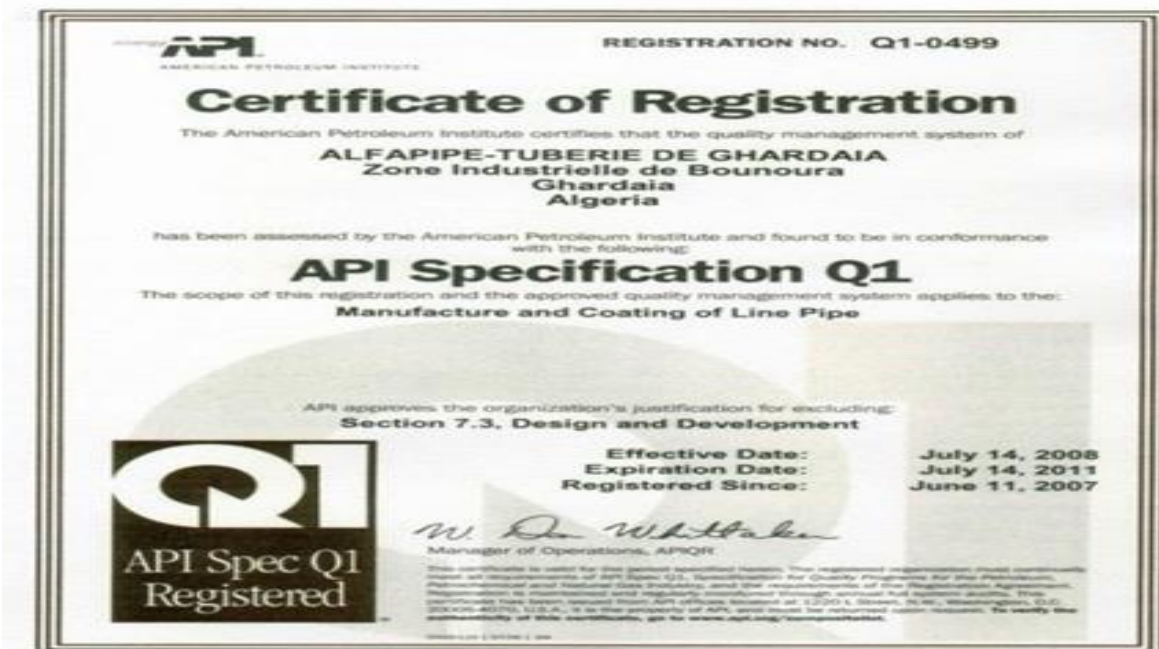


Figure 3 : Le Certificat de la Spécification Q1

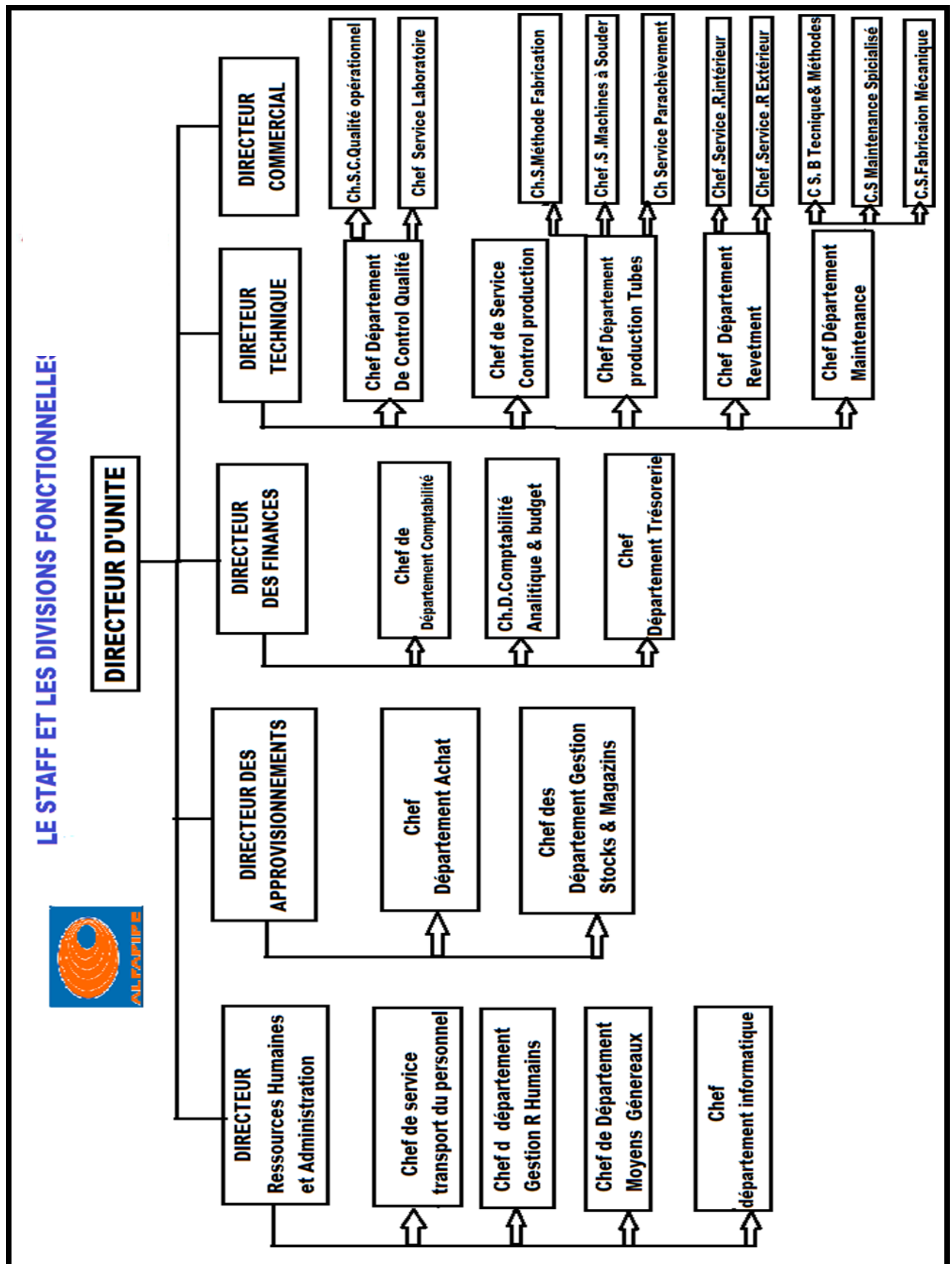


Figure 4 : Le STAFF ET LES DIVISIONS FONCTIONNELLES

Objectifs visés par le projet :

L'entreprise ALFA PIPE GHARDAIA a pour but de transformer les bobines et les produits plats en tubes spiraux pour transporter le pétrole, le gaz, l'eau et tous autres liquides sous haute pression.

Pipeline :

- Oléoducs (transport du pétrole).
- Gazoducs (transport du gaz).
- Hydraulique :
 - Transport d'eau.
 - Alimentation en eau potable.
 - Infrastructure hydraulique.
 - Assainissement .
 - Drainage.
 - Soutien puits.

Caractéristique du produit et gamme de fabrication :

Diamètres : de 16 à 64 pouce (406.4 à 1625.6mm). Epaisseur de la paroi : 8 à 16mm.

Nuance d'acier : X42- X52- X60- X70-X80.

Longueur de tube : de 7 à 13 mètres.

Pression d'épreuve : selon spécification jusqu'à 153bars.

Norme : API 5 L

Différents contrôles de la qualité sont réalisés au sein de ces deux unités, la qualification des soudures est une exigence requise par les normes internationales et appliquée avec rigueur .

Le Contrôle de la qualité :

Les essais mécaniques assurent en général, plusieurs rôles :

La Qualification des soudeurs :

Il s'agit de vérifier l'aptitude des soudeurs ou des opérateurs de soudage à réaliser des assemblages.

. La Qualification d'un mode opératoire :

Il s'agit de vérifier que le mode opératoire choisi convient en fonction

- De la destination des assemblages
- Des matériaux de base et d'apport
- Du procédé de soudage

Rôle de bureau technique :

La cellule bureau technique regroupe toutes les fonctions technico- administratives suivantes :

- **La préparation** : elle est prise en compte par des agents qui assurent :
 - La préparation en terme, déroulement de travail.
 - La sortie des gammes d'entretien, des travaux de révision et des travaux neufs.
- **L'ordonnancement** : est pris en charge par des agents qui assurent :
 - La création et la mise à jour permanente des dossiers techniques.
 - Les études des visites d'inspection et l'organisation de leurs exécutions.
- **La fonction gestion** :
elle est prise charge par des agents qui assurent ; l'ensemble des taches quotidienne et de synthèse des données techniques et économique service.

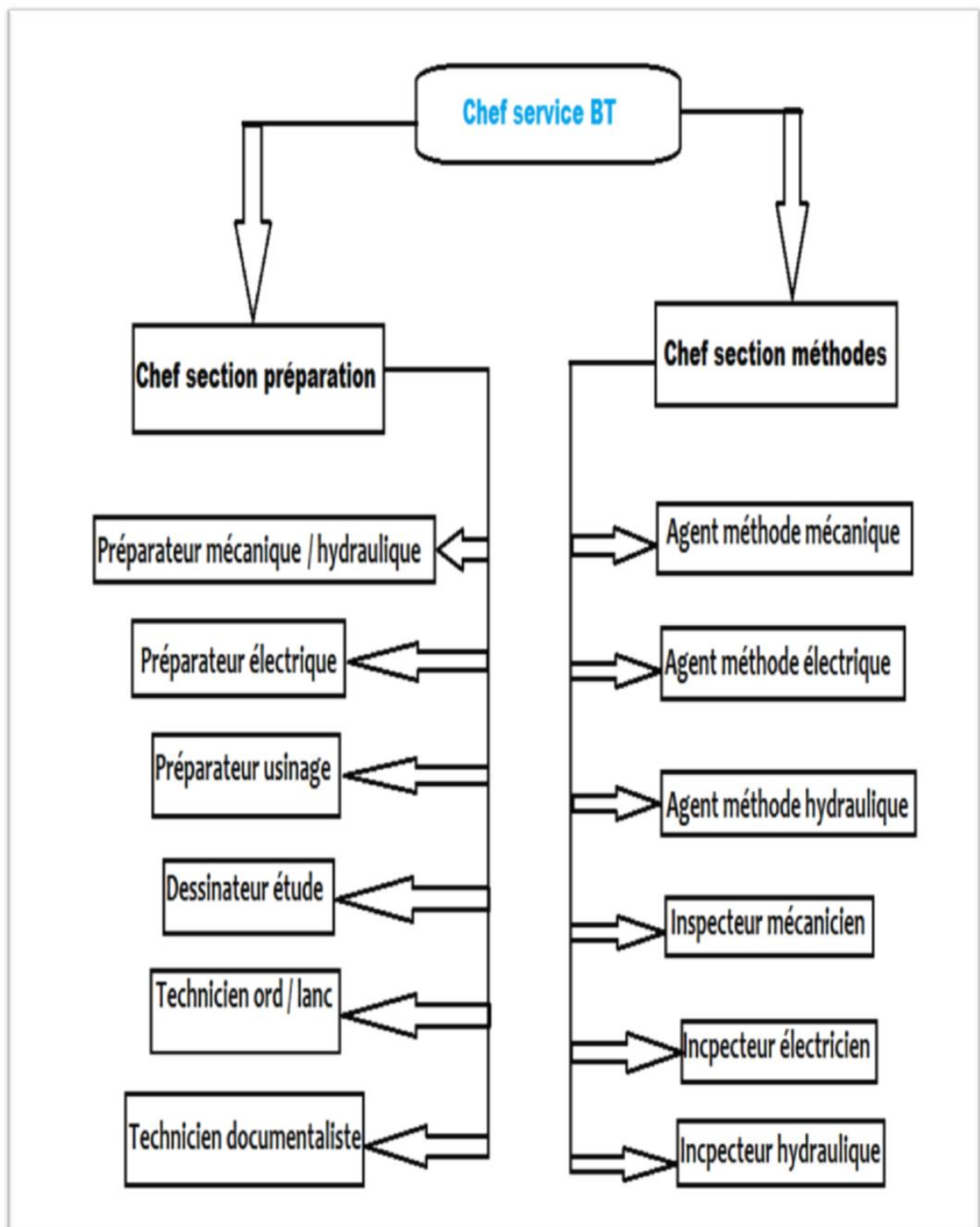


Figure 5 : le PLAN DE PLANIFICATIONS

II.5.2 L'atelier de production est constitué de :

- Deux laboratoires, de chimie et l'autre qui prend en charge les essais mécaniques.
- Trois centres opérationnels de base (COB) dont chacun est constitué de plusieurs installations :

❖ Un C.O.B de fabrication

Il est constitué de :

- Une machine de préparation bobines : pour enlever la couche corrosive.
- 4 machines à souder.
- 2 machines de nettoyage des tubes.
- Une machine de traitement de flux.

❖ Un C.O.B de parachèvement : Il est constitué d' :

- Une machine de radioscopie.
- Une machine de radiographie.
- Une machine de chanfrenage.
- Une zone de réparation.
- Un banc d'essais hydrostatique

❖ Un C.O.B d'enrobage :

- Le rinçage.
- Le séchage.
- Le brossage.
- Le grenaillage

Système de stockage :

L'usine dispose de plusieurs zones de stockage spécialisées, réparties comme suit :

- Magasins de matières premières : destinés au stockage des bobines d'acier, du flux de soudage et du polyéthylène (PE).
- Magasin central : subdivisé en plusieurs annexes selon les types de produits stockés, tels que :
 - Annexe moteurs
 - Annexe Epoxy, etc.
- Magasin de pièces de rechange : organisé en rayonnages, chacun dédié à une catégorie de pièces en fonction de leur nature :
 - Rayonnage mécanique : axes, roulements, visserie, joints, etc.
 - Rayonnage hydraulique
 - Rayonnage électrique, etc.
- Magasin d'outillage : réservé au stockage des outils nécessaires aux opérations de maintenance et de production.

L'entreprise utilise un logiciel local d'approvisionnement et de gestion de stock appelé Bok Stock.

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

II Chapitre :

II.1 Généralité sur les aciers

L'acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone).

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferroalliages par exemple.

II.2 Histoire de l'acier :

L'Âge du fer se caractérise par l'adaptation du bas fourneau à la réduction du fer. Ce bas fourneau Produit une loupe, un mélange hétérogène de fer, d'acier et de laitier, dont les meilleurs morceaux doivent être sélectionnés, puis cinglés pour en chasser le laitier.

En poussant le vent, on attise la combustion et la température de fusion du métal est atteinte. On extrait le métal par vidange du creuset : c'est la production au haut fourneau. On obtient alors de la fonte, le fer liquide se chargeant de carbone au contact du charbon de bois. En effet, deux phénomènes complémentaires se déroulent dans le creuset du haut fourneau : le fer se charge de carbone lorsqu'il arrive au contact du charbon de bois, ce qui abaisse son point de fusion. Puis ce métal fondu continue à s'enrichir en carbone, en dissolvant le charbon de bois. Les premières coulées de fonte ont été réalisées par les Chinois durant la période des Royaumes combattants (entre -453 et -221). Ceux-ci savent aussi brûler le carbone de la fonte, en le faisant réagir avec de l'air, pour obtenir de l'acier. Il s'agit du procédé indirect, car l'élaboration de l'acier se fait après l'obtention de la fonte. En Europe et en Asie, durant l'Antiquité, on produisait également de l'acier en décarburant le fer avec des gaz de combustion et du charbon de bois (acier de cémentation). [17]

Réaumur, en réalisant de très nombreuses expériences et en publiant les résultats de ses Observations en 1722, fonde la sidérurgie moderne : il est le premier à théoriser le fait que l'acier est un état intermédiaire entre la fonte et le fer pur, mais les connaissances du temps ne lui permettent pas d'être scientifiquement précis. Il faut attendre 1786 pour que la métallurgie devienne scientifique : cette année-là, trois savants français de l'école de Lavoisier, Berthollet, Monge et Vandermonde présentent devant l'Académie royale des sciences un Mémoire sur le fer dans lequel ils définissent les trois types de produits ferreux : le fer, la fonte et l'acier. L'acier est alors obtenu à partir du fer, lui-même produit par affinage de la Fonte issue du haut fourneau. L'acier est plus tenace que le fer et moins fragile que la fonte, mais chaque transformation intermédiaire pour l'obtenir augmente son coût.

La révolution industrielle apparaît grâce à la mise au point de nouvelles méthodes de fabrication et conversion de la fonte en acier. En 1856, le procédé Bessemer, est capable d'élaborer directement l'acier à partir de la fonte. Son amélioration par Thomas et Gilchrist permet sa généralisation. Ces découvertes, mènent à la fabrication en masse d'un acier de qualité (pour l'époque). Enfin, vers la seconde moitié du XIX siècle, Dimitri découvre les transformations polymorphes de l'acier et établit le diagramme binaire

fer/carbone, faisant passer la métallurgie de l'état d'artisanat à celui de science.

II.3 Fabrication de l'acier :

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

- Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.
- Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique. [18]

II.4 Les aciers à haute limite d'élasticités :

II.4.1 Introduction :

Le laminage à chaud est une technique puissante de mise en forme dont les applications sont très variées. Une grande majorité des matériaux métalliques est soumise à un formage par laminage au cours de son cycle de fabrication. Bien que le mot laminage évoque plus spécifiquement les produits plats, de nombreux autres procédés de laminage sont utilisés pour obtenir d'autres géométries (fils, ronds, barres, tubes, rails, etc.). [19]

Le laminage à chaud a donc une position importante parmi les diverses techniques de mise en forme et ne cède le pas que pour des applications particulières qui révèlent d'autres techniques telles que le forgeage, le filage,.

II.4.2 Influence de la composition chimique :

Les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) sont des aciers micro alliés au niobium, au vanadium, et au titane. Les autres éléments principaux entrant dans la composition chimique de ces aciers sont : le Carbone, le Manganèse, l'Aluminium, le Silicium, et le Molybdène.

Ils sont également communément connus sous le nom des aciers à dispersoïdes relativement aux éléments formant des phases d'insertion stable (Nb, V, Ti). Les principaux constituants structuraux de ces aciers sont : la ferrite, la perlite, et les phases secondaires qui des carbures, des nitrures et des carbonitrures des éléments dispersifs.

Les HLE sont généralement laminés à chaud et s'emploient à l'état brut de laminage ou à l'état amélioré pour les constructions soudées et les pipelines. Selon la norme américaine API ils sont classés en plusieurs grades : X52, X60, X70.

II.4.3 Influence des éléments de substitution :

Le manganèse : en raison de ces propriétés, le manganèse se trouve, en plus au moins grande qualité, dans presque tous les aciers, il joue un rôle déterminant lors de l'élaboration de l'acier. Il participe à la désoxydation, réagit avec le soufre (donc désulfurant), évitant ainsi la fissuration à chaud, pendant la fusion de l'acier, il absorbe les gaz, détruit les oxydes se

trouvent dans le bain en fusion en forte dose et contribue ainsi à la formation d'un métal dense et sans soufflures et régissant l'état inclusion aïre du métal. Il intervient sous multiples formes

- Il abaisse la teneur en carbone à l'eutectoïde.
- Il durcit la ferrite en solution solide et modifie la solubilité du carbone et de l'azote dans cette phase.
- Il empêche la formation des carbures inter granulaires fragilisant.
- Il élargit le domaine de métastabilité de l'austénite et retarde donc le début de la transformation en conditions isothermes aussi bien dans le domaine ferritique que dans le domaine bainitique.

C'est un élément efficace pour la trempabilité, surtout si on veut éviter un grossissement du grain ou un accroissement du taux d'austénite résiduelle.

- Il a un effet favorable sur la résistance à la rupture.
- Il diminue la susceptibilité au vieillissement après écrouissage car il abaisse les températures auxquelles se produit la transformation.

Dans le cas des aciers à haute limite d'élasticité (acier au Nb, V), sa teneur est de l'ordre de 1.5%, il à fixer le soufre sous forme de MnS insoluble dès la solidification.

Le silicium : Il se rencontre à faible teneur dans les aciers, il est alors utilisé comme Désoxydant.

A plus forte teneur, il augmente la résistance à l'oxydation et confère certaines propriétés

Particulières (perméabilité meilleure). Il durcit l'acier, mais l'empêche de souder.

Les aciers contenant le Si et le Mn sont appelés mangano-siliceux, ils ont la faculté de présenter après traitement thermique un taux élevé d'allongement élastique.

Leur résilience est bien meilleure que celle des aciers au carbone, ils supportent une trempe

Énergétique sans risque d'éclatement moléculaire. L'effet durcissant du silicium en solution solide est aussi fort que celui du manganèse, de plus le silicium augmente la trempabilité que l'on doit contrôler pour améliorer la soudabilité (la teneur limite dans le cas des aciers à dispersoïdes au Nb-V est de l'ordre de 0.3%.

Molybdène : C'est un élément alpha gène qui tend à former des carbures et qui augmente

Largement la capacité de trempe des aciers. Il repousse vers la droite le domaine perlitique en

Affectant peu la position du domaine bainitique, le molybdène est donc particulièrement favorable à l'obtention des structures bainitique. A teneur équivalente, sa contribution est supérieure à celle du chrome.

II.4.4 Influence des éléments formants des précipités :

L'aluminium : C'est surtout un désoxydant, le rôle du nitrure d'aluminium, qui inhibe le

Grossissement du grain austénitique, est bien connu. L'aluminium comme le chrome, augmente la résistance à l'oxydation des aciers, il peut intervenir dans certains processus de durcissement (effet durcissant).

Le vanadium : En faible proportion, cet élément augmente la dureté des aciers sans diminuer leur allongement ni leur résilience, c'est un désoxydant énergétique qui améliore la qualité de l'acier. Une teneur en vanadium de 0.5 à 0.7% suffit pour transformer les propriétés d'un acier.

La résistance à la traction et à la fatigue est sensiblement augmentée et l'acier est moins sujet aux ténacités de trempe. Cet élément élève la température, pour éviter des plages douces après traitement.

Les carbonitrides du vanadium sont mis en solution à une température proche de 1000°C et

Ne peuvent donc pas empêcher le grossissement du grain austénitique. Leur précipitation a lieu en partie dans l'austénite et en partie en ferrite.

Le niobium : Ce métal résiste à la plupart des aciers, il est ajouté sous forme d'alliages

Ferreux appelés Ferro-niobium, plus faciles à introduire à la fusion. Il a été révélé qu'en ajoutant dans des aciers à bas taux de carbone une faible proportion (0.1%) de niobium, on élève avantageusement la limite d'élasticité, cette amélioration est due au fait que le métal présente un grain plus fin que l'acier de carbone de même nuance, et que ce résultat a été obtenu, dans des produits laminés beaucoup plus économiquement avec le niobium que toute autre méthode. La résistance de ces produits permet une réduction du poids et une économie de 20 à 30%. Ils sont livrés sous forme de tôles, barres et peuvent être améliorés davantage par traitement thermique et ils présentent une bonne soudabilité.

II.4.5 Domaine d'utilisation :

Freiner la recristallisation de l'austénite en solution solide. Former des précipités lors de la transformation austénite-ferrite.

Cette précipitation a un effet durcissant mais également fragilisant. La présence des carbonitrides (carbures) du niobium non dissout freinent le grossissement du grain austénitique avant écrouissage.

Le titane : Il forme des carbonitrides (carbures), il permet de fixer l'azote. Il se combine avec

Le soufre en donnant naissance des sulfures non déformés. L'emploi de cet élément demande des précautions car il a tendance à former gros précipités de nitrures qui ne se dissolvent pas, d'où la difficulté d'éviter la fragilisation. Il a un effet durcissant à l'état brut de laminage ; il freine la recristallisation dans l'austénite ou dans la ferrite ; il sert à affiner les grains lors d'une normalisation.

II.4.6 Influence de la perlite :

La présence du carbone confère aux aciers leurs propriétés. Le carbone n'a pas besoin d'être ajouté comme addition, mais il doit être réglé à la valeur désirée. Le carbone en solution a un effet durcissant important :

La quantité de perlite est proportionnelles à la teneur en carbone et dépend des éléments d'alliage en solution solide ; elle augmente fortement la résistance de l'acier, mais son effet est bien moindre sur la limite d'élasticité, environ deux à trois fois moins.

Le rôle du carbone sur la résistance à la rupture fragile est très important car les lamelles de Cémentite servent à la fois de défauts d'amorçage et pour la propagation des clivages.

II.4.7 Mécanismes de durcissements des aciers HLE :

Afin de satisfaire à toutes les exigences liées aux multiples applications de l'acier, celui-ci doit présenter un grand nombre de caractéristiques alliées à un bas prix de revient.

L'emploi d'aciers de construction ayant des caractéristiques améliorées constitue la seul moyen pour alléger les constructions, de même le rendement des machines dépend dans une large mesure de la résistance de leur éléments les fortement sollicités. [20]

Des améliorations peuvent être apportées aux caractéristiques des différentes façons suivantes

- Par solution solide.
- Par précipitation.
- Par dispersion.
- Par affinement de grain.
- Par écrouissage.
- Par traitement thermique.

II.4.8 Solution solide :

Quand ils ne réagissent pas avec le métal de base, les atomes d'éléments d'alliage peuvent soit occuper des sites naturels dans le réseau de la matrice (en formant des solutions solides de substitution), soit s'insérer entre ces sites(en formant une solution solide d'insertion). La distorsion du réseau qui en résulte le rend plus dur. Le durcissement peut aussi être dû du fait que ces atomes de soluté se logent de préférence au Voisinage de défauts réticulaires (lacunes et dislocations), dont le mouvement est ainsi ralenti.

Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande Variété d'assemblages à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. A l'heure actuelle 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 indémontables, notamment dans l'univers de la construction mécanique, pour fabriquer des bateaux, trains avions, fusées automobiles, ponts, tuyauteries, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage. [3]

Avant la naissance du soudage au 19^{me} siècle et son passage rapide aux mains des Techniciens, l'assemblage des matériaux était réalisé principalement par forgeage. Les premières techniques de soudage utilisaient l'électricité comme source d'énergie, tel que le soudage à l'arc avec électrode enrobée, dont l'invention date de 1904, ou le soudage par résistance. Vers la même période, l'arrivée du soudage oxyacétylénique (soudage aux gaz) utilisant l'acétylène et l'oxygène pour produire une flamme dont la température atteint 3100°C permet de constituer un joint entre les parties à assembler par mélange du métal à l'état liquide puis solidification.

En 1930, l'introduction de fils-électrodes fusibles facilite l'automatisation de l'apport de métal et conduit au développement du procédé de soudage à l'arc submergé. Dès 1940, des scientifiques américains ont essayé de maintenir l'arc électrique, amorcé à l'aide d'une électrode non fusible en tungstène, au sein d'un gaz inerte afin de protéger le métal chauffé de l'oxydation, ce qui conduit au développement du procédé TIG (Tungsten Inert Gas).

Le procédé MIG (Métal Inert Gas) apparaît quelques années plus tard, vers 1950. Il Utilise comme électrode un fil de métal d'apport fusible à dévidage continu et de l'argon ou de l'hélium comme gaz de protection. Le remplacement de ces gaz par du CO₂ donne ensuite naissance du procédé MAG (Métal Active Gas). L'invention du soudage par faisceau d'électrons, en 1958, permet de souder en une seule passe de fortes épaisseurs, grâce à la vaporisation localisée du métal qui permet de réaliser des joints étroits et profonds.

Avec l'introduction du procédé laser dans les années 1980, les opérations de soudage deviennent encore plus rapides [4].

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes Les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux les formes de Construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service [5].

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives D'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par Chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base [6].

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques Telles que :

- Le type d'énergie mise en œuvre ;
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur) ;
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide) ;
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser [7].
- Procédés de soudage de pièces métalliques : Soudage à la flamme, Soudage électrique par résistance, Soudage à l'arc électrique avec électrodes enrobées (SMAW), Soudage par friction, Soudage par friction malaxage ou soudage thixotropique, Soudage à l'arc sous flux (SAW).

Le soudage avec électrodes enrobées (SMAW) :

Soudage à l'arc, à la baguette, MMA (Manuel Metal Arc), SMAW (Shielded Metal Arc Welding) ou encore SAE (Soudage à l'Electrode Enrobée) sont les différents noms que l'on trouve pour ce procédé

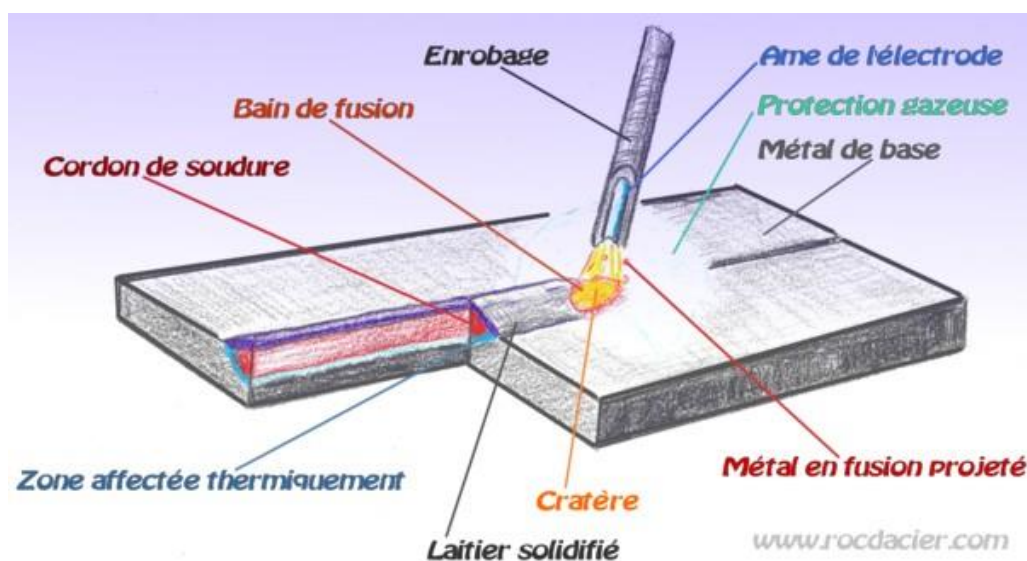


Figure 6 Schéma soudage à l'électrode [9]

II.5.5 Définitions du soudage à l'arc (électrode enrobée).

Le soudage à l'électrode enrobée est souvent appelé « soudage à l'arc », il utilise des baguettes comme métal d'apport. [9]

La soudure autogène à l'électrode enrobée consiste à mettre en fusion l'acier des pièces à souder et de les assembler grâce à un métal d'apport (l'âme de l'électrode).

Pour obtenir cette fusion, il faut une température très élevée, (3200°C) qui est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode) en créant un arc électrique qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois une lumière et une chaleur intense. [9]

La “baguette” fond dans le bain de fusion formant ainsi la soudure, l'enrobage de l'électrode (laitier) fond à la température de l'arc et protège la soudure contre l'oxydation [9].



Figure 7 : Soudeur à l'électrode enrobée [09]

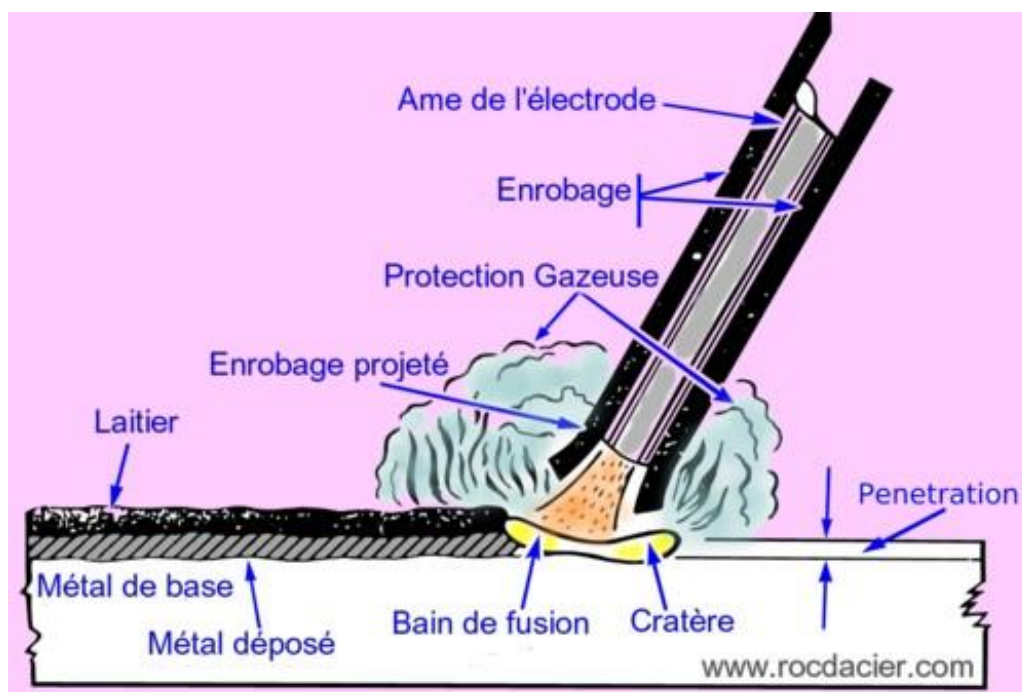


Figure 8 : schéma de l'électrode [9]

II.5.5 . L'arc électrique

Pour qu'il y ait un arc électrique, il faut [9]:

- la présence d'une tension suffisante entre les électrodes
- le maintien d'une intensité minimale
- un milieu suffisamment ionisable.

Un milieu ionisable : le gaz présent entre les électrodes (souvent l'air ou un gaz protecteur) doit pouvoir être ionisé afin de permettre le passage du courant sous forme de plasma conducteur.



Figure 9 Image de l'arc électrique [9]

II.5.5 Installation de soudage à l'électrode enrobée

Schéma de l'installation

- Prise de raccordement électrique de 380V, permet la mise sous tension du poste à souder.
- Poste à souder.
- Pince de masse, passage du courant électrique se fixe sur un établi ou une pièce à souder
- Support métallique (flan de tôle), permet le passage du courant de la masse vers l'élément à souder.
- Porte électrode.
- Etabli, permet de travailler de façon idéale.[9]

II.5.5 Amorçage en soudage à l'arc et stabilité de l'arc électrique

L'amorçage d'un arc électrique est la création dans la veine d'air d'un arc électrique entre l'électrode (ou baguette) et la pièce à souder. Pour amorcer, il suffit de gratter la tôle. Il faut éviter de taper les électrodes. Parfois, lorsque l'on débute surtout, ou que les électrodes sont humides, ou que les intensités sont faibles, les électrodes collent à la pièce.[9]

La stabilité de l'arc électrique dépend de la facilité qu'a le soudeur à maintenir l'arc aussi régulier que possible. Pour réussir une soudure de qualité, la stabilité de l'arc est essentielle. Elle est influencée par la qualité du générateur de soudage utilisé, mais aussi par :

- les caractéristiques du courant (nature, polarité, intensité, fréquence)
- la conductivité du milieu (selon la nature de l'enrobage)
- la longueur d'arc (le plus court possible)

II.5.5 . Influence de l'intensité de courant en soudage à l'arc avec électrode enrobée [9]

En règle générale, si vous avez une intensité élevée, l'amorçage sera facilité, mais la vitesse de fusion de l'électrode est trop rapide et les projections sont plus abondantes.

En revanche, si vous avez une intensité faible, l'amorçage sera difficile. Il y'a un risque de collage de l'électrode à la pièce pendant le soudage. Il y'a un risque de défaut de collage (métal d'apport qui ne pénètre pas le métal de base) et un manque de pénétration.

Le réglage de l'intensité dépend du diamètre de l'électrode, et du type de cordon à réaliser.

- En soudage à plat : **$I=50x$ (Diamètre électrode – 1)**
- En soudage en angle intérieur (Il faut 20% de plus qu'en soudage à plat, donc): **$I=60x$ (Diamètre électrode – 1)**
- En soudage en angle extérieur (Il faut 20% de moins qu'en soudage à plat, donc): **$I=40x$ (Diamètre électrode – 1)**

Ces réglages sont des valeurs approchées qui doivent être ajustées en fonction des soudeurs.

II.5.5 . Nature du courant de soudage et polarité en soudage à l'arc

II.2.6.1 Le courant continu (ou redressé).

Ce courant produit un arc de grande stabilité. Il permet aussi de choisir la polarité de l'électrode. Il est recommandé dans la plupart des cas.

Aux intensités élevées, il présente l'inconvénient de provoquer une déviation gênante de l'arc par un phénomène que l'on appelle soufflage magnétique.

Ensuite, la **polarité** a aussi une importance non négligeable.

En **polarité directe**, l'électrode est reliée au pôle négatif (-). Elle est cathode. Le courant va de l'électrode vers la pièce. Le bain de fusion est étroit et profond. Cette polarité favorise la pénétration et c'est la plus utilisée.

En **polarité inverse**, l'électrode est reliée au pôle positif (+). Elle est anode. Le courant va de la pièce vers l'électrode. Le bain de fusion est large et peu profond. L'électrode est très chaude. On utilise cette polarité pour certains métaux ou pour limiter le taux de dilution.

II.2.6.2 Le courant alternatif.

Ce courant est produit par des transformateurs. Il présente l'inconvénient de produire un arc de stabilité moindre. Pour remédier à cela on utilise des électrodes à enrobage ionisant.

II.5.5 Choix du courant de soudage et de la polarité en fonction des matériaux soudés.

	Courant alternatif	Courant continu	
		Polarité directe	Polarité inverse
Aciers non alliés	+	++	
Aciers inoxydables	+	++	
Fontes	+	++	
Aluminium et alliages	++		+
Rechargements durs	+		++
Electrodes basiques			++

II.5.5 . Les sources de courant Caractéristiques du transformateur de soudage.

L'installation comporte toujours, un générateur de courant, une pince porte électrode et une prise de masse.

Suivant les techniques de soudage pour lesquelles sont construits les postes, les caractéristiques de la source changeront. Comme le soudage à l'arc avec électrodes enrobées est manuel, on a des variations importantes de la longueur d'arc. La tension varie, donc l'intensité varie. Pour améliorer la stabilité de l'arc, on utilisera des postes à caractéristiques tombantes [9].

Pour le soudeur, les caractéristiques les plus importantes sont:

- la nature du courant délivrée
- la tension à vide U_0
- la plage de réglage des intensités
- le facteur de marche [9]



Figure 10 : Soudeur à l'arc [9]

Appelé aussi SAW (Submerged Arc Welding), soudage sous flux, ou encore sous flux en poudre. Il a été le premier procédé automatisé du soudage.[9]

II.5.5 Définition du procédé :

Le procédé sous arc submergé (SAW) ou procédé N° 121 est une technique de soudage à l'arc électrique avec électrode fusible sous flux électro-conducteur en poudre. [9]

Schéma du soudage sous flux

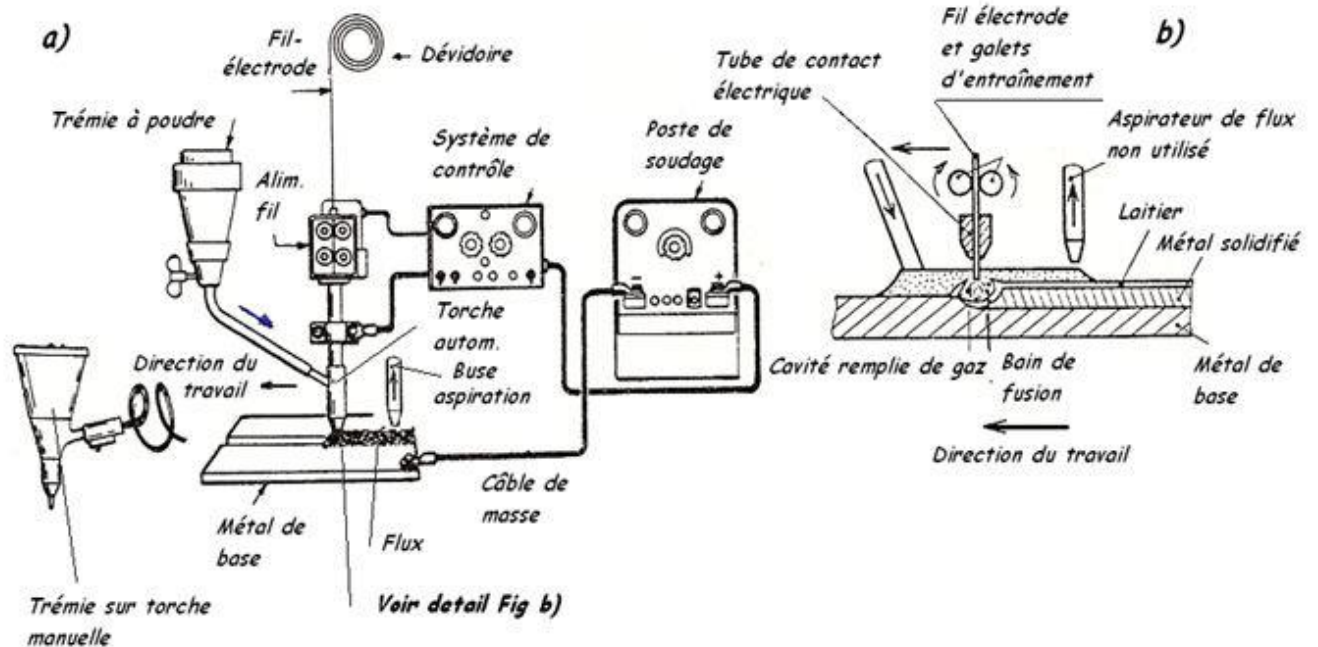


Figure 11 : Schéma du soudage sous flux [9]

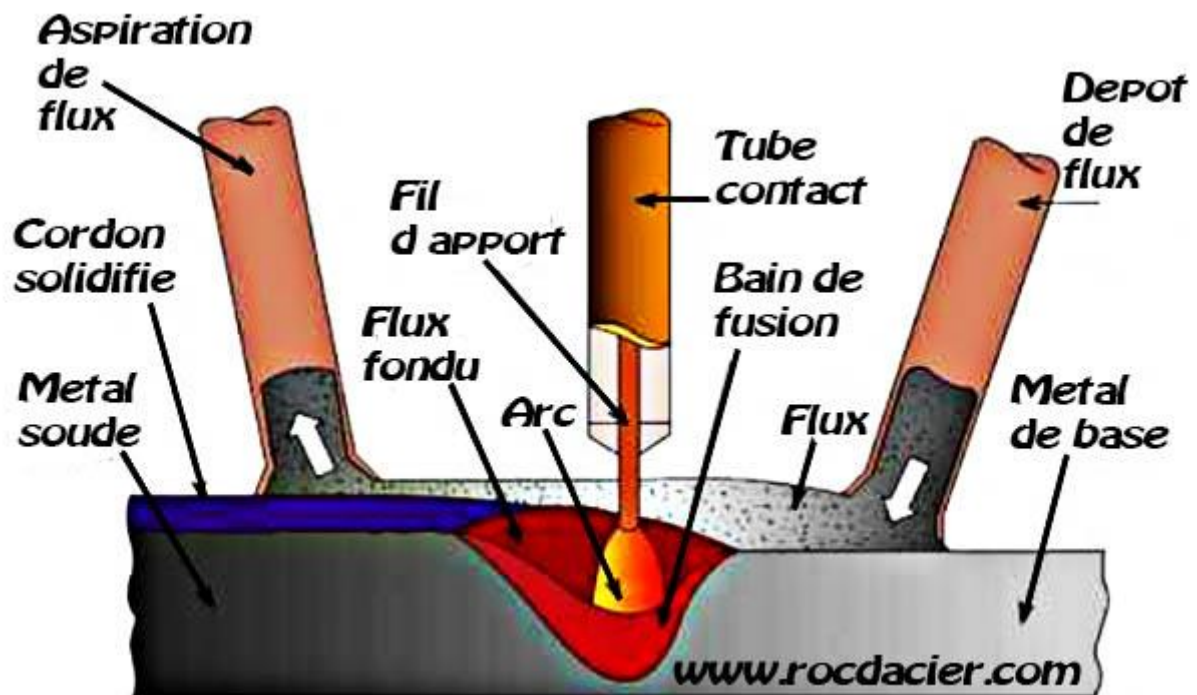


Figure 12 : Schéma du soudage sous flux [9]

II-7.2.Principe :

L'arc électrique est transféré du fil électrique, à travers le flux en poudre, déversé en talus autour de celui-ci. De cette façon, le rayonnement de l'arc est circonscrit. Ceci assure la fusion simultanée des pièces à souder avec appui d'un ou plusieurs fils-électrodes fournissant le métal d'apport. Ce fil plein, fil fourré ou feuillard est dévidé soit à vitesse constante comme en MIG, soit avec une vitesse asservie à la tension de soudage en fonction des caractéristiques du poste. Ce transfert du métal fondu dans l'arc de soudage se fait par gouttelette enrobée de flux fondu protégé par sa gangue de laitier qui est auto-détachable à froid.

Le métal déposé est lissé et brillant. L'excédent de flux qui n'a pas été fondu est aspiré et récupéré après tamisage. Ce procédé automatisé permet d'effectuer des soudures de pleine pénétration sur des pièces en acier de fortes épaisseurs et sur des longues distances.

Les dimensions commerciales des fils sont de 1,6, 2, 2,4, 3,2, 4, 4,8 et 5,6 mm, les intensités de 200 à plus de 1000 A. Le fil cuivré assure une bonne conduction du courant

Remarque :

- La pénétration est proportionnelle à l'intensité, qui intervient peu sur la largeur du cordon.
- La largeur du cordon est proportionnelle à la tension de soudage, qui a peu d'influence sur la pénétration.

Caractéristiques d'arc : Ce procédé peut être utilisé avec deux modes de régulation de l'arc électrique CC ou CV.

CC = Mode à tension constante ($U_s = C_{ste}$): Il s'adapte très bien aux électrodes de petits diamètres ($\leq 3,2$ mm), en offrant une très bonne stabilité de l'arc ainsi qu'une bonne réactivité du système car il maintient une vitesse de dévidage de fil constante tout en régulant l'intensité afin de maintenir la tension au point de fonctionnement, ce qui garantit un taux de dépôt constant.

CV = Mode de courant constant ($I_s = C_{ste}$): Il est utilisé pour des électrodes de gros diamètres ($> 3,2$ mm), il régule la vitesse de dévidage du fil afin de maintenir la tension et l'intensité au point de fonctionnement, ce qui garantit une pénétration constante.

L'arc submergé peut fonctionner en :

- Courant continu (+) pour obtenir une pénétration maximale.
- Courant continu (-) pour obtenir un taux de dépôt maximal
- Courant alternatif pour une solution intermédiaire entre le CC+ et le CC- et pour limiter le soufflage magnétique.

On peut trouver sur certains postes des fonctions avancées telles que :

- Le contrôle d'amorçage (Strike Time) ou l'amorçage de l'arc peut être amélioré en ajustant la vitesse du fil au démarrage.
- Le contrôle de l'amorçage / du cratère (Arc Start Control/Crater Control): Le démarrage et l'arrêt d'une opération de soudage sont toujours deux périodes de transition critique, qu'il faut bien maîtriser. Les paramètres de soudage peuvent être ajustés pendant ces phases de soudage, pour contrôler la pénétration et le remplissage.
- Temps de Burnback (Burnback Time): qui est une fonction prévenant le risque de collage du fil dans le joint soudé à la fin du cordon. Ce temps correspond à une remontée du fil hors du bain de fusion.

Essentiellement utilisé en automatique, le procédé SAW est employé pour des pièces ayant des épaisseurs allant de 2 mm jusqu'à 200/300 mm et apporte, à la fois en usine et sur chantier, une grande vitesse de soudage et des taux de dépôt élevés. On rencontre ce procédé, avec un ou plusieurs fils dans beaucoup d'industries, notamment en charpente métallique, chantier naval, chaudronnerie (appareils sous pression), tuyauteries industrielles, industrie chimique / pétrochimique, rechargement cylindres de laminaires, etc

Matériaux utilisés : Acier carbone, aciers inoxydables, aciers base nickel.

Les flux et leurs rôles [9] :

Acides ou basiques, ils sont obtenus par fusion au four électrique, puis broyés, ou encore par agglomération de poudres. Ils contiennent des éléments désoxydants (silicium, manganèse, aluminium). Leurs rôles s'apparentent à ceux des enrobages des électrodes déjà examinés en soudage manuel à l'arc.

Les éléments d'alliage que l'on désire apporter au métal fondu sont incorporés dans le fil, mais peuvent être également apportés par le flux.

Une granulation fine permet un meilleur aspect du cordon de soudure, ainsi qu'un soutien efficace du métal fondu en angle positionné.

Une granulation à gros grains facilite le dégazage du bain et éloigne le risque de porosité du métal fondu

II.8.1. Classification des fils et flux [9]



Figure 13 : Soudage sous flux [9]

Deux normes régissent actuellement les fils et flux en soudage SAW, telles que :

- La norme ASME II Part C (AWS) – SFA 5-17/5-23
- La norme européenne EN 756 pour des électrodes et couples fils/flux et la norme EN 760 pour les flux de soudage SAW contenus dans la EN ISO 14171.

Il existe d'autres normes, telles que les normes russes, mais qui, généralement sont similaires à la norme ASME.

II .8.2.Classification selon la norme AWS

Exemple : E M 12 K

E = électrode

M = teneur en Mn ($\approx 1\%$) => (L $\approx 0,5\%$; H $\approx 2\%$)

1 ou 2 chiffres donnant la composition minimale en C (ex. 12 = 0,12%)

Eventuellement la lettre K indiquant que l'acier est " calmé " au silicium (ex. 0,1% de Si)

Pour le flux, la désignation est la suivante :

F = flux

1 = chiffre désignant la contrainte de rupture minimum en 10 psi (1000 psi = 1 ksi = 6,9 N/mm²) La lettre A ou P : A = métal déposé brut de soudage ou P = après traitement thermique

1 chiffre désignant les exigences de résilience (ou la lettre Z s'il n'y a pas de prescription à ce sujet)

La désignation du flux doit être accompagnée de la désignation du fil avec lequel il est combiné pour obtenir les propriétés énoncées.

1-Classification pour les fils-électrodes et couples fils/flux suivant EN 746 et classification pour les flux de soudage à l'arc submergé

a) Classification suivant EN 746

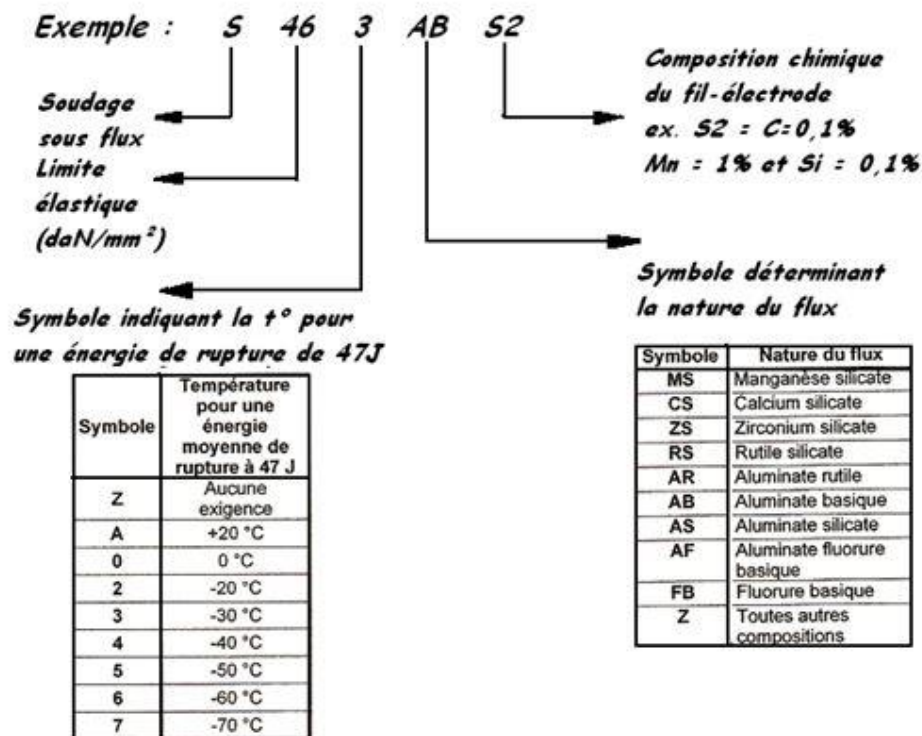


Figure 14 Classification pour les fils-électrodes et couples fils/flux suivant EN 746

b) Classification suivant EN 760

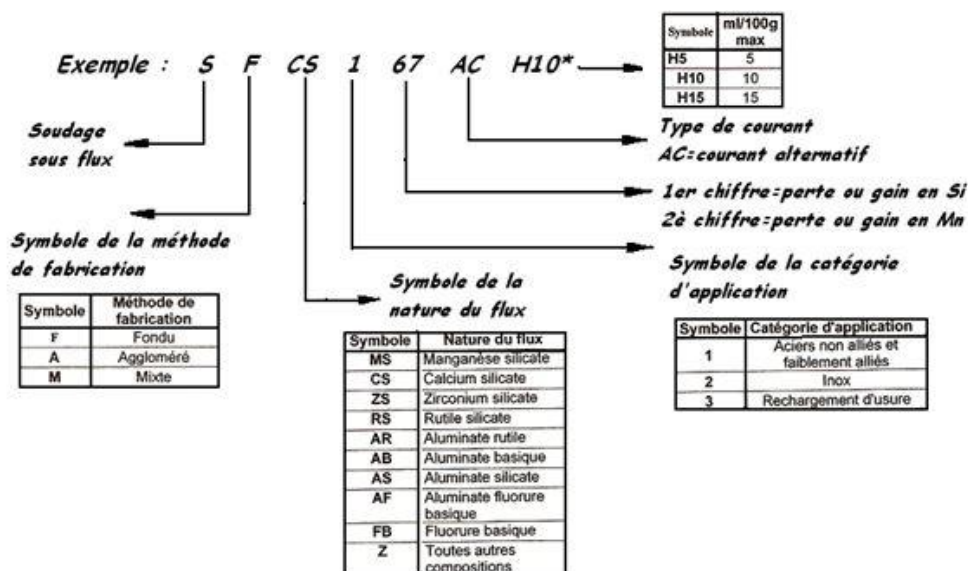


Figure 15 Classification suivant EN 760

Technique de soudage [9]

Il y a lieu de prévoir un support pour la première passe où quelques cordons sont généralement déposés par le procédé MIG, où l'arc électrique est dans le chanfrein ou directement à revers. Le chanfrein est rempli par des passes multiples à la machine automatique. Les dernières passes dites d'aspect sont effectuées en augmentant la tension (U_s) afin d'obtenir un cordon plus large et moins bombé. La vitesse d'avance varie selon les paramètres adoptés.

Son ordre de grandeur est fonction de l'épaisseur soit de 30 à 100 cm/min voir 150 cm/min dans certains cas. Généralement on limite cette vitesse entre 35 à 45 cm/min

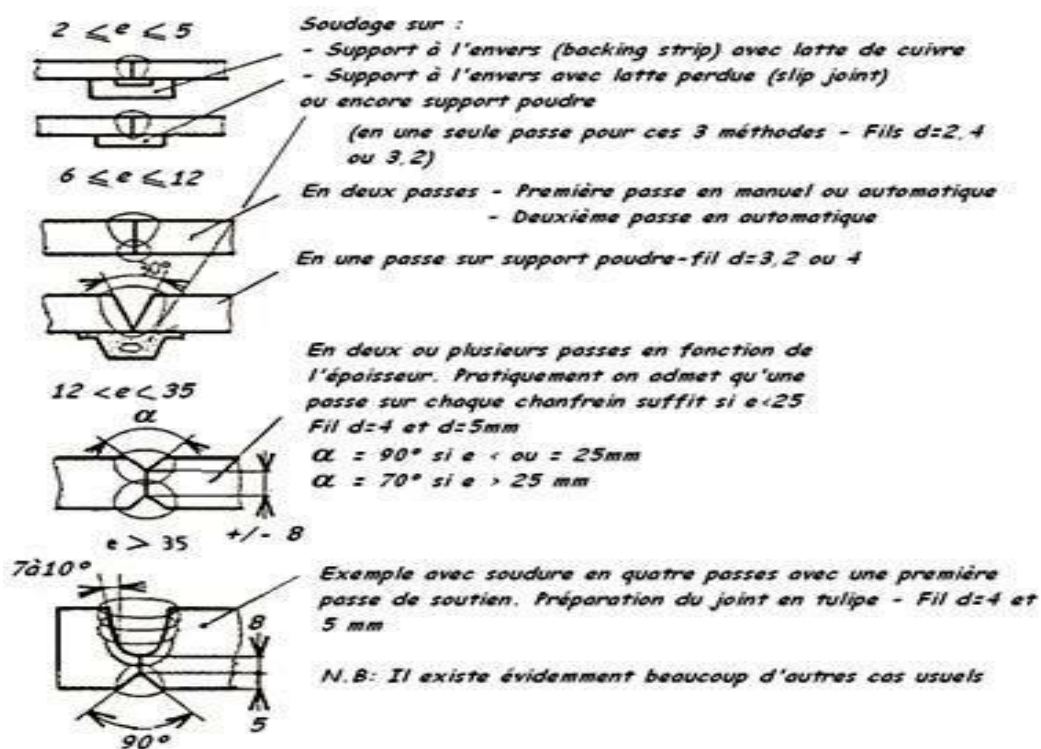


Figure 16 : Volume métal d'apport [9]

Consommation en fil et flux [9]

La consommation de fil correspond à la quantité de métal nécessaire pour former le cordon de soudure, avec des pertes négligeables. À titre d'exemple, la figure 29 illustre le volume de métal à déposer pour remplir un chanfrein en fonction de son angle d'ouverture, auquel s'ajoute le volume requis pour réaliser le bombement du cordon. La consommation en flux croît avec la finesse de son grain et un accroissement de la tension. Le rapport de consommation $\approx$ Masse de métal déposé / Masse de fluide fondu $\approx 0,7$ et $1,6$

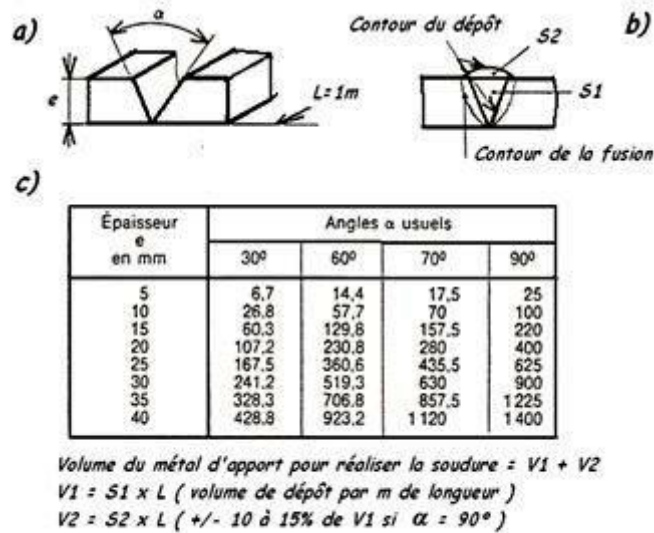


Figure 17 : Taux fusion soudage sous flux [9]

Taux de fusion des fils [9]

Les Fig 30 et 30* montrent quelques exemples de vitesse de fusion. Elles permettent, compte tenu du volume à déposer ou de la masse dépendant du volume, de situer rapidement, mais toujours avec approximation, le temps de fusion nécessaire à la réalisation d'une soudure (Fig 28 et Fig 29).

Exemple : Pour $I_s = 750A$, un fil $d=4mm$

Pôle + à l'électrode a une vitesse de fusion voisine de 172 cm/min et dépose 165 g/min de métal (Fig 30).

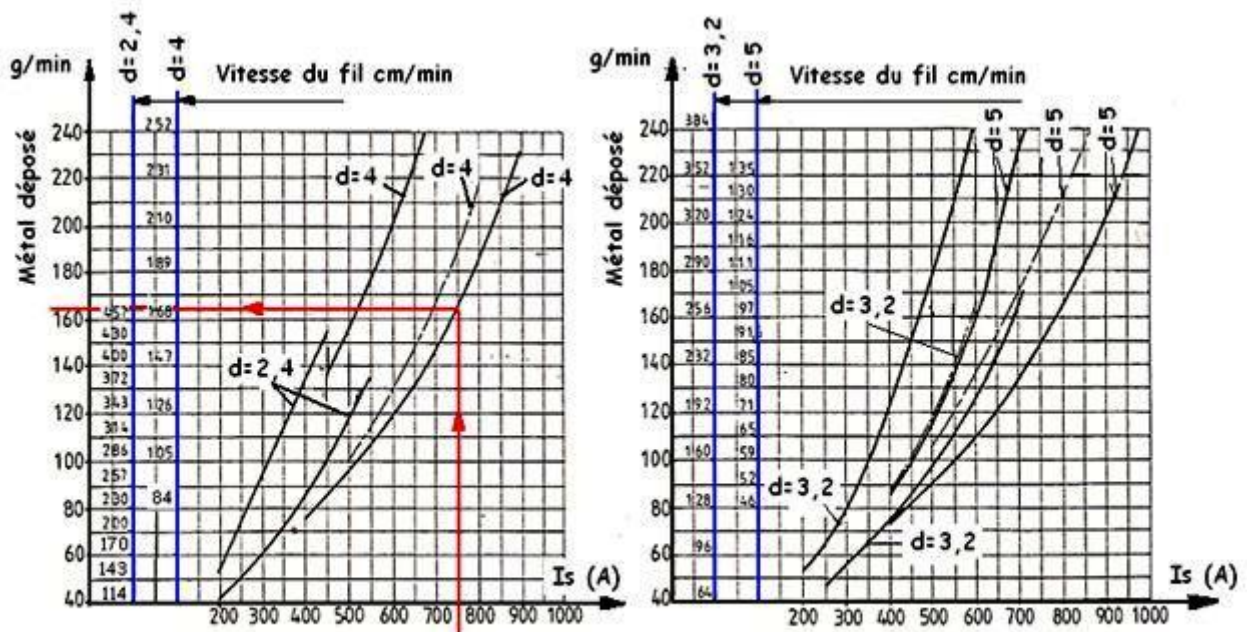


Figure 18 : Métal déposé [9]

Ce procédé permet le soudage des aciers inoxydables. La vitesse de fusion des fils est 1,2 fois supérieure à celle des aciers non alliés. Des procédés MULTIFIL sont également utilisés pour augmenter la productivité. Cependant, malgré les possibilités offertes (60 mm en 2 passes sur chanfrein en X), on préfère souvent, pour la qualité du joint, de bénéficier de l'auto-recuit du soudage obtenu en multi-passes. Réservés au soudage à plat, de grandes longueurs rectilignes, ou de viroles, Il existe des procédés spécifiques permettant d'assurer la tenue du flux durant les opérations de soudage en position corniche. [9]

Variantes de soudage sous flux

II.5.5 Soudage avec fil toronné (Fig 32a)

Ce type de soudage consiste à entourer l'électrode principale de deux fils enroulés en hélices droite et gauche dont le but est :

- De supprimer les effets d'induction
- D'amener le courant au fil-électrode central, le flux remplissant les interstices laissés entre les spirales.
- Une protection de CO₂ améliore le procédé. [9]

II.5.5 Soudage sous fil-fourré (Fig 32b et 32d)

Le fil électrode est une gaine métallique enrobant le flux contenu à l'intérieur (inverse de l'électrode manuelle).

Trois procédés sont utilisés :

- Le soudage avec l'arc sous flux solide
- Le soudage avec protection supplémentaire de CO₂
- Le soudage à l'arc sans protection extérieure [9]

Dans ce cas, le fil-fourré doit contenir, en plus des éléments désoxydants des flux précédents, des substances volatiles capables de chasser l'air au voisinage de la soudure pour en assurer la protection.

Exemple : Action du carbonate de calcium.

II.5.5 Soudage sous flux magnétique (Fig 32c)

Un flux pulvérulent contenant 60% d'éléments magnétiques est amené autour du fil-électrode. Au-passage du courant, le flux est collé autour du fil par le champ magnétique et entraîné par ce fil au cours de son déroulement.

Une protection de CO₂ améliore le procédé.

Le rapport Masse du flux/Masse électrode $\approx 1/3 \Rightarrow$ Les intensités sont comprises entre 200 et 500A.

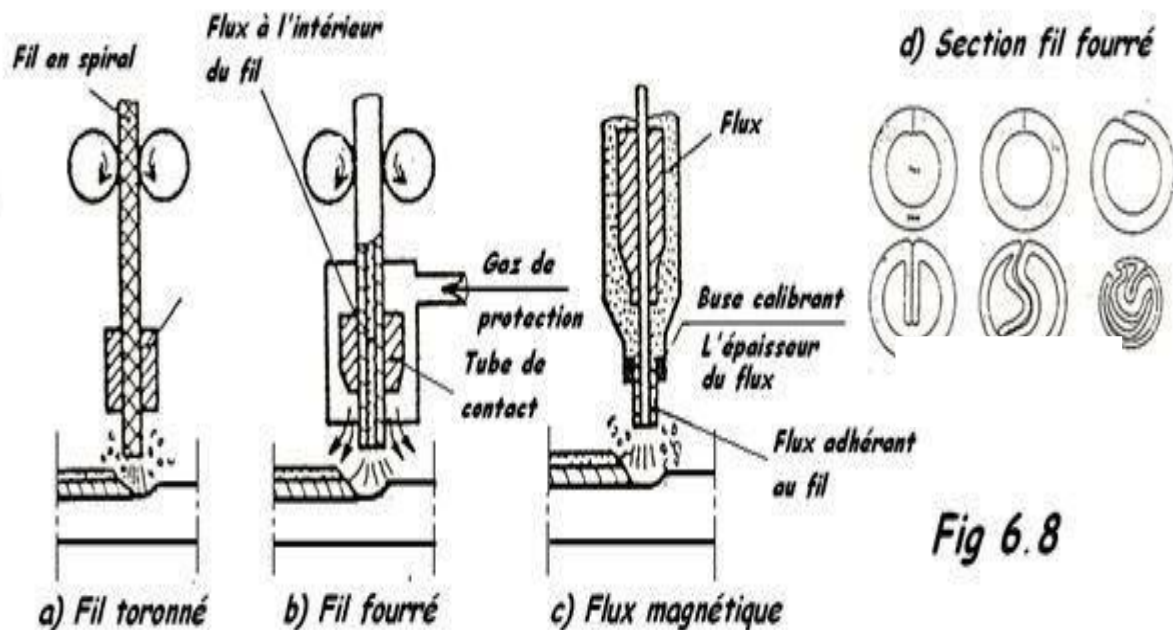


Figure 19 : Différents modes de soudage sous flux [9]

II.5.5 Avantages et inconvénients du procédé



Figure 20: Photo du soudage sous flux [9]

Avantage :

- Régularité du travail
- Vitesse d'exécution
- Réduction de main-d'œuvre
- Augmentation de la pénétration et dès lors, réduction des angles de profondeur de chanfreinage
- Soudage de fortes épaisseurs (avec un seul fil-électrode), on peut déposer un cordon de l'ordre de 12 mm [9].

Inconvénients :

- Réglage délicat de la machine nécessite une bonne maîtrise des paramètres pour garantir une soudure de qualité.
- Flux contaminable surtout dans le cas où celui-ci contient des éléments d'alliage
- Joint invisible durant l'opération
- Préparation particulièrement soignée
- Soudage en position horizontale ou à plat. Actuellement il y a possibilité de souder en corniche et même en vertical (avec utilisation de patins).
- Propriétés mécaniques parfois quelconques en fonction de l'importance du dépôt

Certaines machines peuvent être pourvues de plusieurs fils-électrodes, soit :

- Connectés en parallèle aux bornes d'une même source de courant et placés en "tandem" (L'une derrière l'autre) ou de part et d'autre de l'axe du joint "en traverse"; la distance qui les sépare est de 7 mm.
 - Ecartés de 25 à 35 mm, placés en tandem et connectés chacun à une source de courant distincte
 - Connectés chacun à l'une des bornes d'une source de courant unique.
- L'arc éclate entre ces deux fils-électrodes et la pièce est en dehors du circuit de soudage. Ce procédé est caractérisé par une faible dilution, ce qui rend intéressant ce procédé dans les techniques de rechargement. Enfin, le fil peut être remplacé par un feuillard (ruban) lorsqu'on désire recouvrir d'acier inoxydable des tôles épaisses (cladding). L'arc électrique sautille alors d'une extrémité à l'autre de la section transversale.[9]

Les électrodes :

Les électrodes de soudages sont constituées par :

- Une âme métallique dont le rôle est de conduire le courant et dont la fusion forme le métal déposé ;
- Un enrobage concentrique à l'âme dont la composition permet de remplir plusieurs rôles :
- Stabilité électrique de l'arc ;
- Protection du métal en fusion ;
- Apport d'éléments dans le métal déposé [10].

Protection de métal en fusion :

L'atmosphère créée lors de la fusion de l'enrobage isole le métal liquide de l'oxygène et de l'azote de l'air. Chaque goutte de métal est entourée d'une protection de laitier qui viendra. Ensuite surnager sur le bain de fusion en formant aussi le départ des gaz occlus [10].

Apport d'élément:

Au cours de la fusion, certains constituants plus volatils ont tendance à disparaître, comme le manganèse, l'enrobage compense alors ces pertes. De surcroît, l'enrobage fournit des constituants nouveaux (molybdène, nickel...). Le laitier modifie également la tension superficielle du métal liquide, donnant au cordon une forme plus ou moins concave [10].

Types d'électrodes :

Les électrodes se définissent par le diamètre de l'âme et la nature chimique de l'enrobage.

Les diamètres normalisés sont : (1,25-1,6-3,15-4-5-6)mm

Les enrobages les plus utilisés sont :

- L'enrobage cellulosique ;
- L'enrobage basique ;
- L'enrobage rutile.

Enrobage	Facilité d'utilisation	Résistance mécanique	Positions	Courant	Applications typiques
Cellulosique	Moyenne à bonne	Moyenne	Toutes	CC	Pipeline, structures sur site
Basique	Difficile	Excellente	À plat	CC	Charpentes, tuyauterie sous pression
Rutile	Très facile	Moyenne à bonne	À plat/horizontal	CA/CC	Soudage général, entretien, fabrication



Figure 21 : Électrodes de soudage [10]

Le fil de soudure et le flux

Le fil de soudure

Sa composition la suivante

C 0.10% ; Mn 1% ; Si 0.10% ; Mo 0.05% ; Fe98%.

Ce produit incombustible doit être stocké dans des containers pour éviter la reprise d'humidité.

Taille de grains 0.05 à 2 mm

Non soluble dans l'eau. La densité 1.0g/cm³ [1]

Caractéristiques mécaniques du fil de soudage (SAW)

Essai traction du fil

Test temps (C°)	Rp 0.2 (N/mm2)	Rm (N/mm2)	A %
RT	546	616	26

RT : Température ambiante

Test temp (C°)	KV (J)	KV moy (J)		
-40	124	76	104	101

L'essai a été effectué à -40 °C, une température basse pour tester le comportement du matériau en conditions extrêmes (froid intense).

KV (J)	Signification
124 J	L'éprouvette a absorbé beaucoup d'énergie → zone plus tenace
76 J	Rupture plus facile → zone plus fragile ou localement affaiblie
104 J	Comportement intermédiaire
Moyenne : 101 J	Représente la résilience moyenne du matériau à -40 °C

Conclusion :

Le fil testé présente une bonne ténacité à basse température, ce qui est un critère favorable pour des applications en environnement froid (industrie pétrolière, structures métalliques en extérieur, etc.).

Analyse chimique du fil

C	Si	Mn	P	S
0.12	0.2	1.01	< 0.01	< 0.01



Figure 22 : Le fil de soudure [1]

Le flux :

Les flux agglomérés ont un aspect mat par rapport aux flux fondus. Pour fabriquer ce type de flux, les constituants sont mélangés à sec puis liés avec du potassium ou du silicate de sodium. Le flux est ensuite chauffé à une température inférieure au point de fusion et reste ainsi à l'état d'une poudre ensuite triée au tamis et emballée.

Le flux aggloméré de soudage utilise dans la soudure des tubes en ALFAPIPE est de type P223, sa composition est : Magnésie 20%, Fluorures 20%, Silice 20%, Alumine 20%.

Taille de grains 0.05 à 2 mm [1]

Analyse chimique du flux

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V
0.16	0.32	1.01	0.07	0.01	0.03	0.03	0.48	< 0.01	< 0.01	< 0.01

Le produit identifié ci-dessous a été fabriqué, examiné et fourni dans la conformité et Avec un programme de qualité qui remplit la condition d'ISO 9001 V2000.



Figure 23 : Le flux [1]

Définition : [9]

On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné, par un procédé et un type d'application donnés, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences globales de leur présence, satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement.

On distingue :

- La soudabilité locale ou métallurgique
- La soudabilité globale ou constructive
- La soudabilité opératoire ou relative

II.5.5 Soudabilité métallurgique : [9]

Elle est conditionnée par les transformations métallurgiques, sous l'effet de la fusion et du refroidissement postérieur, dans les zones soudées (métal déposé et ZAT) et qui peuvent conduire à des structures fragiles dans lesquelles des risques de fissuration peuvent apparaître, dont le plus important est le risque de fissuration à froid. Lorsque l'on examine la coupe macrographique Fig 37 d'un assemblage soudé, on constate l'existence de zones distinctes :

II.5.5 La zone fondue : Partie du métal de base participant à la réalisation du joint et la zone de remplissage dont la section dépend de la nature du chanfrein et de l'épaisseur des pièces à souder.

II.5.5 La ZAT : Zone Affectée Thermiquement ($t^\circ > A_{c3}$) appartenant au métal de base mais ayant subi les effets du cycle thermique. Sa morphologie est cependant hétérogène à causes des différentes températures atteintes et l'on distingue, près de la zone fondue, la zone de liaison qui subit la température la plus élevée et qui est, par conséquent, la plus perturbée.

II.5.5 Le métal de base : Le métal n'a pas subi d'effets thermiques

Remarque : La Fig 38 illustre l'effet de la température sur les grains d'un acier au carbone ou faiblement allié.

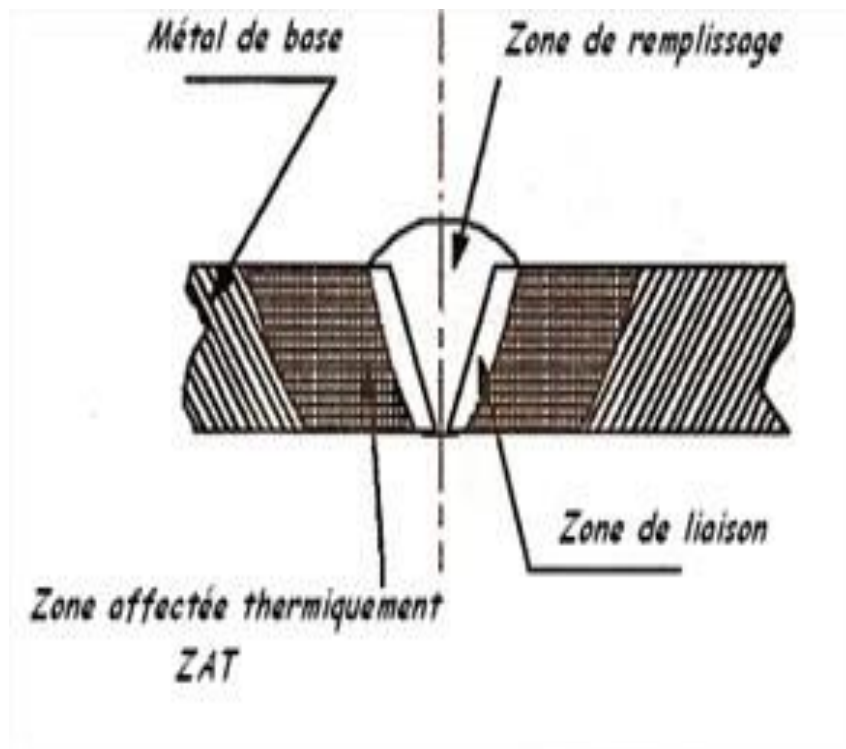


Figure 24 : soudures et zones [9]

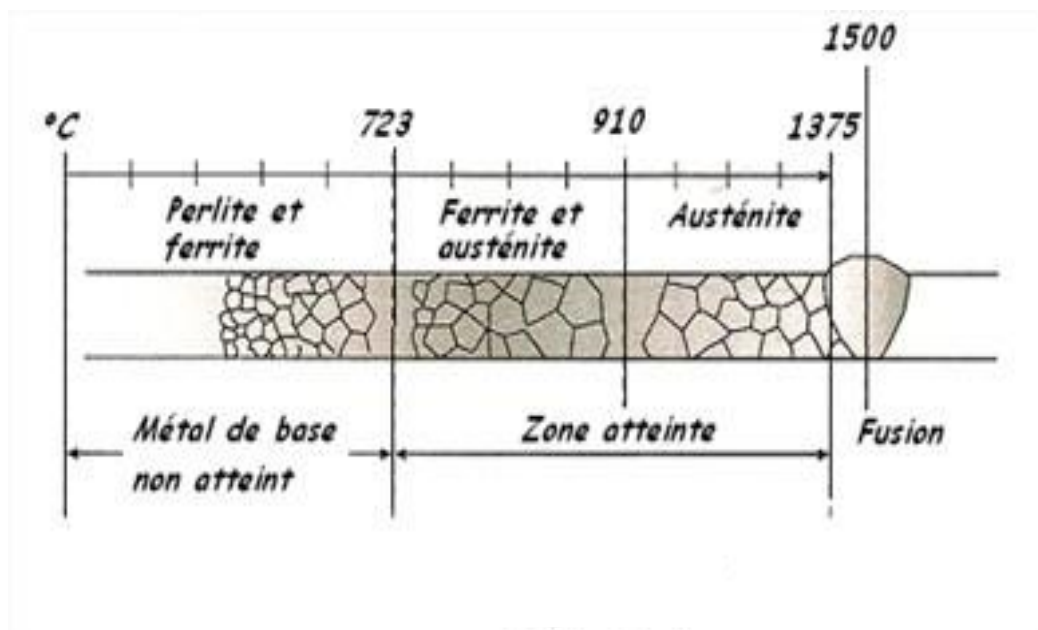


Figure 25 : Macro et grains acier [9]

II.5.5 La soudabilité de certain alliage : Les propriétés physiques qui influent sur la soudabilité des aciers inoxydables, comparativement aux aciers carbone, sont la suivantes :

- Un point de fusion inférieur : la température nécessaire pour obtenir la fusion du métal est moins élevée; par conséquent, l'énergie nécessaire pour le soudage sera moindre.
- Une conductivité thermique plus faible : ce facteur renforce la nécessité de réduire l'apport énergétique lors du soudage, car la conductivité thermique influence directement le choix des paramètres de soudage selon le matériau. Une résistance électrique plus élevée : plus la résistance électrique est élevée, plus le bain de fusion est facile à créer. Par contre, l'amorçage de l'arc est plus difficile.
- Pour toutes ces raisons, la taille de la ZAT d'un acier inox sera de 50% plus importante que celle d'un acier au carbone, dans les mêmes conditions (voir EN 1011-3).
- Les fontes blanches ne se soudent pratiquement pas. Les autres fontes (grises, malléables et nodulaires) peuvent être soudées sous certaines conditions. Les fontes nodulaires étant de loin les plus faciles à souder (voir EN 1011-8)
- Les alliages d'aluminium sans durcissement structural (Al pur, Al + Mg, Al + Mn, Al + Si) ont une bonne soudabilité (TIG, MIG, plasma) avec métal d'apport compatible. Les alliages à durcissement structural (Al + Mg + Si, Al + Cu, Al + Zn + Mg) sont plus difficile à souder (MIG) et nécessitent plus de précautions (EN 1011-4).

II.5.5 Influence des éléments d'addition et des impuretés : [9]

La métallurgie actuelle fait de plus en plus appel à des aciers ayant des caractéristiques de plus en plus complexes. Si l'ajout de certains éléments confère à ces aciers des propriétés intéressantes, ceux-ci vont modifier les réactions au soudage. Quant aux impuretés, elles jouent toujours un rôle important sur les résultats mécaniques.

II.5.5 Eléments d'addition (principaux) : [9]

- **a) Carbone (C)** : C'est l'élément prépondérant lors du soudage. Quoique nécessaire pour augmenter la résistance à la rupture, son rôle sera à la fois actif et défavorable. Son influence sur l'effet de trempe du métal de base et dans la ZAT est importante. Il peut agir seul, mais très souvent en relation avec d'autres éléments trempant tels que le Mn; Cr et Mo par exemple.
- **b) Manganèse (Mn)** : Comme pour le carbone, il augmente la résistance à la traction mais ne diminue pas l'allongement. Par son rôle désoxydant, les caractéristiques sont donc améliorées. Ex. à 13%, il confère à l'acier une forte résistance aux chocs et à l'usure (acier Hadfield). Dans le cas des aciers ordinaires, sa teneur varie de 0,3 à 0,9% et pour les aciers à haute limite élastique (HLE) de 1 à 1,8%.
- **c) Chrome (Cr)** : Élément trempant très actif, c'est la raison pour laquelle sa teneur reste inférieure à 1% dans les aciers au carbone, de la classe des soudables. A forte teneur en (C) et de (Cr), les aciers sont durs et résistent à l'usure. Allié au nickel (Ni), ils constituent les aciers inoxydables et réfractaires. A très basse teneur en (C) et à un pourcentage de 13%, il fait partie de la gamme des aciers spéciaux dits » intachables « . Le chrome est un élément dont on doit tenir compte lors du soudage.
- **d) Nickel (Ni)** : Sans conférer un rôle trempant aux aciers, il améliore les propriétés générales. Allié au chrome, il constitue les aciers inoxydables. Il est utilisé dans les aciers auto-trempant

allié au (Cr) et au (C) et surtout dans les aciers travaillant à basse température (3 à 9% et $T^{\circ} \approx -190^{\circ}\text{C}$).

- **e) Molybdène (Mo)** : Très actif au point de vue trempe, élément noble. Dans les aciers de construction, la teneur est en générale de 0,5 à 1%, dans ce cas, il augmente la résistance à chaud (fluage) et diminue les risques de fragilité. Il améliore la résistance à la corrosion dans les aciers inoxydables (ex. tuyauterie véhiculant de l' UREE dans l'industrie chimique).
- **f) Cuivre (Cu)** : Toujours à faible teneur (0,5%), il améliore la résistance à la corrosion à l'eau de mer (ex. palplanches). Attention aux porosités lors du soudage avec des électrodes de qualité médiocre.
- **g) Silicium (Si)** : Agent désoxydant, se retrouve en faible pourcentage ($\leq 0,2\%$) sans influence néfaste. Au-delà, il augmente la résistance à la traction, mais diminue l'allongement.
- **h) Aluminium (AL)** : Affine le grain, il est retenu dans la composition du métal d'apport pour le soudage oxy-acétylénique des aciers. C'est un désoxydant efficace.
- **i) Titane (Ti)** : Il s'oppose à la trempabilité à l'air des aciers au chrome courants. C'est un élément puissant de résistance à la surchauffe. Il combat la précipitation du (C) et réduit la corrosion inter granulaire. Il donne une meilleure résistance à chaud à l'oxydation (soudures). C'est un agent stabilisant dans les aciers inoxydables.

Recherche du carbone équivalent (Ceq)

Utilisé pour les aciers au carbone, le carbone équivalent est une mesure qui détermine assez bien la trempabilité d'un acier, car plus la teneur en (C) est élevée, plus l'acier est susceptible de subir la trempe. La soudabilité d'un acier est donc dépendante de son carbone équivalent Ceq. Pour calculer Ceq, on utilise soit la formule établie par l' IIS (Institut International de Soudure) soit la formule du BVRA (GDB) qui font intervenir le carbone, le manganèse, le silicium, le chrome, le molybdène, le vanadium, le nickel et le cuivre. On trouve parfois le phosphore dans certaines formules.[9]

II.5.5 Définition du Carbone Équivalent (Ceq)

Le carbone équivalent est une formule utilisée pour évaluer la trempabilité et la soudabilité d'un acier en tenant compte non seulement du carbone, mais aussi des autres éléments d'alliage (comme Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu, etc.) qui influencent le comportement du matériau lors du soudage.[11]

Il exprime l'effet global de ces éléments comme s'ils augmentaient le pourcentage de carbone, ce qui aide à prédire la formation de structures dures et fragiles (comme la martensite) dans la zone affectée thermiquement (ZAT).[12]

II.5.5 Formule classique du Ceq (norme IIW – International Institute of Welding)

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Cette formule est valable pour les aciers non alliés ou faiblement alliés. Il existe d'autres variantes (AWS, GES, etc.) pour les aciers plus complexes. [13]

II.5.5 Rôle et importance du Ceq :

Permet d'évaluer la soudabilité de l'acier en effet, plus Ceq est élevé, plus l'acier est difficile à souder car Prévoir la formation de martensite dans la ZAT et risque accru si Ceq est élevé.

Il faut donc déterminer les précautions à prendre (préchauffage, post-chauffage, choix du métal d'apport).[13]

II.5.5 Interprétation des valeurs de Ceq :

Carbone équivalent (Ceq)	Interprétation / Conséquences	Préconisations
$\leq 0,40$	Très bonne soudabilité	Pas de précaution particulière
0,41 – 0,50	Moyenne soudabilité	Préchauffage recommandé
0,51 – 0,60	Soudabilité difficile	Préchauffage obligatoire, post-chauffage conseillé
$> 0,60$	Risque élevé de fissuration	Traitement thermique obligatoire, soudage délicat

Il est noté que : [13]

Lors du refroidissement après soudage, un Ceq élevé favorise la formation de martensite et fragilité de la ZAT, ainsi que le risque de fissuration à froid (surtout en présence d'hydrogène),

La nécessité d'utiliser des procédures de soudage qualifiées.

Conclusion :

Le carbone équivalent (Ceq) est un indicateur essentiel pour tout ingénieur soudeur ou métallurgiste. Il permet d'anticiper les comportements thermiques et mécaniques des aciers pendant le soudage et d'adapter les paramètres de soudage, le choix des électrodes et les traitements thermiques nécessaires pour éviter les défauts.

II.5.5 Méthode de l' IIS :

$$Ceq = \%C + \frac{\%Mn + \%Si + \%Cr}{6} + \frac{\%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Figure 26 : Formule carbone équivalent

Le tableau II donne quelques valeurs de C_{eq} pour des aciers connus.

Aciers	N°	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	P	C_{eq}
St 52-3 / S355J2G3	1.0570	0,17	1,2	0,4					0,03	0,45
St 50-2 / E295	1.0050	0,3	1,2	0,4					0,04	0,58
St 60-2 / E335	1.0060	0,4	1,2	0,4					0,04	0,68
St 70-2 / E360	1.0070	0,5	1,2	0,4					0,04	0,78
19 Mn 6 / P355GH	1.0473	0,2	1,4	0,5	0,02	0,2	0,07		0,025	0,57
GS-C 25 / GP240GH	1.0619	0,21	0,7	0,55	0,25				0,025	0,49
StE 355 / P(S)355N	1.0562	0,17	1,3	0,35	0,1	0,2		0,05	0,03	0,52
StE 460 / P460N	1.8905	0,18	1,5	0,45	0,2	0,5		0,1	0,03	0,63
Ck 25 / C25E	1.1158	0,26	0,6	0,3					0,03	0,44
Ck 35 / C35E	1.1181	0,36	0,7	0,3	0,25	0,25	0,05		0,03	0,63
25CrMo4	1.7218	0,26	0,8	0,3	1,1		0,25		0,03	0,71
42CrMo4	1.7225	0,43	0,8	0,3	1,1		0,25		0,03	0,83
16MnCr5	1.7131	0,17	1,2	0,3	1,0				0,03	0,61
20MnCr5	1.7147	0,2	1,3	0,3	1,2				0,03	0,69
21NiCrMo2	1.6523	0,21	0,85	0,3	0,6	0,6	0,2		0,03	0,63
17CrNiMo6	1.6587	0,18	0,55	0,3	1,7	1,6	0,3		0,03	0,84

Tableau II : exemples de Carbone équivalent

Si $C_{eq} \leq 0,4$: L'acier est parfaitement soudable à température ambiante, pas de risque élevé de trempe.

Si $0,45 \leq C_{eq} \leq 0,7$: L'acier est moyennement soudable, un préchauffage de 100 à 400 °C sera nécessaire. La température exacte sera déterminée au paragraphe suivant. On est confronté à un risque de fissuration à froid.

Si $C_{eq} > 0,7$: L'acier est difficilement soudable; préchauffage; électrodes spéciales; traitements thermiques

Influence de l'épaisseur :

Par la suite il faut calculer le carbone équivalent compensé (C_{eqc}) qui va prendre en compte les épaisseurs à souder, soit : $C_{eqc} = C_{eq} (1 + 0,005 e)$

Si $C_{eqc} \leq 0,45$ il n'y a pas de risque de trempe.

II.5.5 Méthode BVRA :

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{20} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{10} + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}$$

Figure 27 : Formule carbone équivalent

Remarque : Chrome et nickel équivalents (pour les aciers inoxydables), ils se calculent au moyen des formules ci-dessous et du » Diagramme de Schaeffler » (Fig 41A).

$$Eq_{Cr} = \%Cr + \%Mo + (1,5 \times \%Si) + (0,5 \times \%Nb) + (0,5 \times \%Ta) + (2 \times \%Ti) + \%W + \%V$$

$$Eq_{Ni} = \%Ni + (30 \times \%C) + (0,5 \times \%Mn) + (0,5 \times \%Co)$$

La composition chimique d'un cordon de soudure dépend des compositions chimiques des métaux d'apport et des métaux de base, ainsi que de la proportion de chacun des métaux. Quant à la structure cristalline, elle dépend de la forme des cristaux dans le cordon de soudure, des conditions de refroidissement, d'un traitement thermique éventuel après soudage.

Le diagramme de Schaeffler (Fig 41A) permet :

- De choisir un métal d'apport adapté, tout en en garantissant de bonnes qualités métallurgiques.
- D'apprécier la structure de la zone fondue
- De prévoir les risques métallurgiques pour l'assemblage soudé.

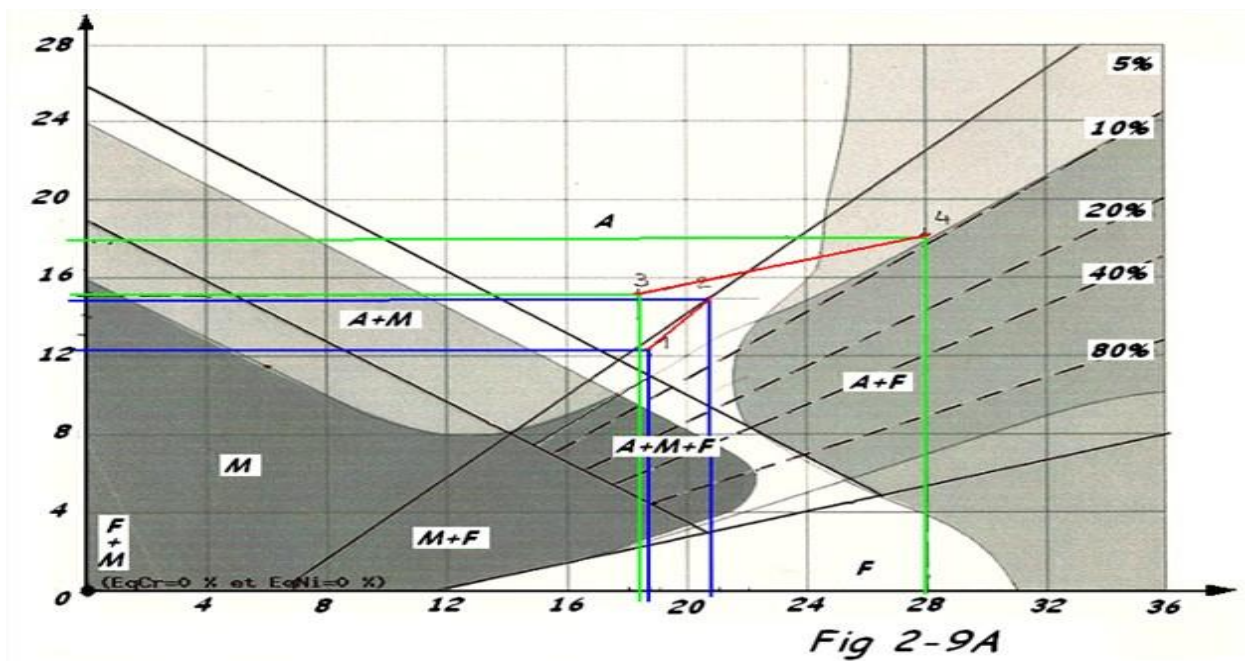


Figure 28:Schaeffer [9]

Il est présenté avec en abscisse l'équivalent chrome E_{Cr} et en ordonnée l'équivalent nickel E_{Ni} .

Il est divisé en 4 zones représentant les différentes structures rencontrées par le soudage des aciers inoxydables, à savoir :

- La MARTENSITE (M) => Fissuration martensitique au-dessus de 400°C.
- L' AUSTENITE (A) => Fissuration à chaud au-dessus de 1250°C.
- LA FERRITE (F) => Risque de grossissement des grains au-dessus de 1150°C.
- L' AUSTENITE – FERRITE (A + F) => Fragilisation en phase sigma après traitement thermique entre 450 et 900°C.

II.2.26.1 Détermination de la température de préchauffage

Il est parfois nécessaire de préchauffer afin d'éviter la formation d'une structure très dure dans la ZAT. Ce durcissement est dû à l'influence du carbone et certains éléments d'alliage. Le durcissement est d'autant plus important que le refroidissement est rapide. Donc, plus la zone de soudage est importante et chaude, plus ce durcissement sera important. On préchauffe alors pour limiter les écarts de températures et on gère le refroidissement de manière à le rendre plus long dans le temps. Ainsi, on limite les risques de durcissement et de fissurations. Plus la température sera élevée, plus la vitesse de refroidissement devra être lente.

La température de préchauffage est fonction de plusieurs paramètres dont :

- La présence de certains éléments d'alliages en plus du carbone.
- De l'épaisseur des pièces à souder.
- Du type d'acier ou de métal
- Du procédé de soudage.
- Du traitement thermique éventuel.
- Du métal d'apport.

$$T_p = 350 \sqrt{(C_{eqc} - 0,25)}$$

Figure 29 : Formule température de préchauffage

- T_p : Température de préchauffage recommandée (en °C)
- C_{eqc} : Carbone équivalent corrigé (ou ajusté), tenant compte de la composition chimique du matériau

II.5.5 But de la formule :

Cette expression permet de déterminer la température minimale de préchauffage avant soudage pour éviter la formation de martensite fragile dans la ZAT (zone affectée thermiquement), en particulier pour les aciers à haute teneur en alliages ou à trempabilité élevée.

Le C_{eqc} , ou carbone équivalent corrigé, est une version modifiée du carbone équivalent classique (C_{eq}) qui tient compte de facteurs supplémentaires pouvant influencer la soudabilité d'un acier, en particulier lors du calcul de la température de préchauffage (T_p).

II.5.5 Différence entre C_{eq} et C_{eqc} :

C_{eq} : formule classique selon l'IIW, basée uniquement sur la composition chimique :

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

C_{eqc} : version corrigée/adaptée du C_{eq} , qui peut intégrer :

- La granulométrie du joint,
- L'épaisseur de la pièce,
- La vitesse de refroidissement,
- Ou simplement une marge de sécurité (souvent +0.02 à +0.05 par rapport au C_{eq}) pour compenser les effets métallurgiques complexes (comme l'effet de l'hydrogène diffusible ou des contraintes internes).

Terme	Signification	Utilisation principale
C_{eq}	Carbone équivalent (brut)	Évaluation générale de la soudabilité
C_{eqc}	Carbone équivalent corrigé ou ajusté	Calculs précis (préparation, préchauffage)

Le CE_{pcm} (Carbon Equivalent by Pcm method) est une formule alternative au C_{eq} (carbone équivalent classique), utilisée principalement pour les aciers modernes à grain fin, comme les aciers pour pipelines (X65, X70...), les aciers microalliés, ou les aciers à haute résistance basse teneur en alliage (HSLA).

II.5.5 Définition du CE_{pcm} :

Le CE_{pcm} ou "Carbon Equivalent – Pcm", signifie "Pourcentage de carbone modifié". Il a été introduit par Nippon Steel (Japon) pour mieux refléter la tendance à la fissuration à froid par l'hydrogène diffusible, en particulier dans les aciers à très faible teneur en carbone.

II.5.5 Formule du CE_{pcm} (selon Nippon Steel) :

$$CE_{pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

Toutes les valeurs sont en % massique

Le bore (B) est multiplié par 5 à cause de son fort effet sur la trempabilité, même à très faible concentration.

II.5.5 Utilisation du CE_{pcm} :

Mieux adapté que le Ceq pour les aciers à très bas carbone.

Très utilisé dans :

- Le soudage de pipelines (API 5L),
- L'industrie automobile (aciers formables),
- Les aciers de structure modernes (S355MC, S500MC, etc.).
- Permet d'évaluer le risque de fissuration retardée (cold cracking) après soudage.

II.5.5 Interprétation des valeurs de CE_{pcm} :

CE _{pcm}	Interprétation
< 0,20	Très bonne soudabilité
0,20 – 0,25	Soudabilité acceptable avec contrôle
> 0,25	Soudabilité délicate, précautions fortes nécessaires (préchauffage, électrodes adaptées, etc.)

II.5.5 Comparaison Ceq vs CE_{pcm} :

Aspect	Ceq (IIW)	CE _{pcm}
Méthode classique	Oui	Non
Adapté aux aciers modernes	Moins	Oui (meilleure sensibilité)
Précision pour fissuration	Moyenne	Excellente
Utilisé pour	Génie civil, charpente	Pipelines, auto, aciers HLE

On peut également utiliser le diagramme de SEFERIAN (Fig 43):

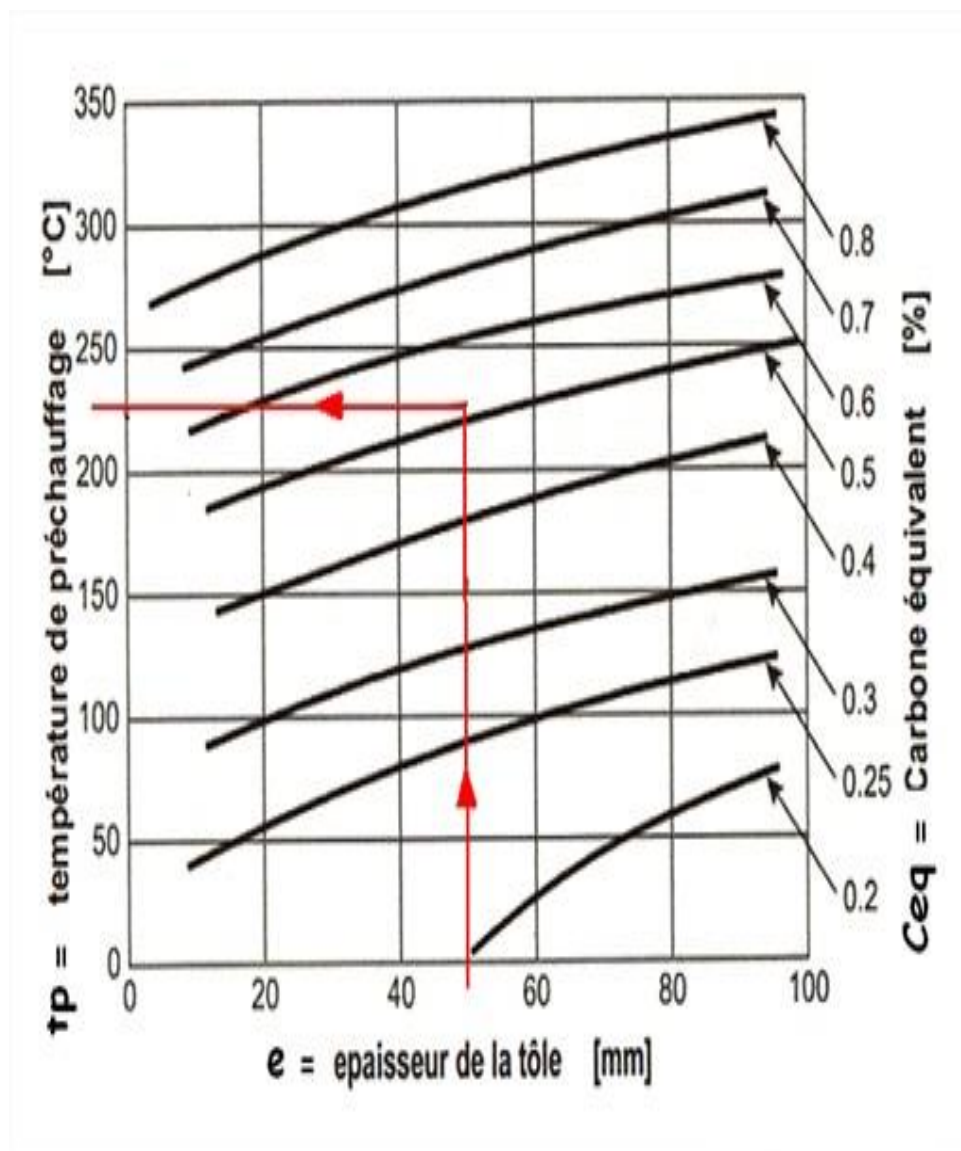


Figure 30 : Diagramme de Séférian [9]

II.5.5 Données de composition (maximales d'après API 5L PSL2)

Pour $e \leq 25$ mm :

Acier	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
X60M	0,12	0,45	1,60	$\leq 0,025$	$\leq 0,015$	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$	$\leq 0,15$
X70M	0,12	0,45	1,70	$\leq 0,025$	$\leq 0,015$	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$	$\leq 0,15$

II.5.5 Méthode IIW (Ceq IIW) :

Formule IIW :

$$Ceq = \%C + \frac{\%Mn + \%Si + \%Cr}{6} + \frac{\%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Supposant $\%V \approx \%0$:

X60M :

$$ceq = 0,12 + (1,60/6) + ((0,50+0,15)/5) + ((0,50+0,50)/15) \approx 0,12 + 0,267 + 0,13 + 0,067 = 0,584$$

X70M :

$$ceq = 0,12 + 0,283 + 0,13 + 0,067 = 0,600$$

Ces Ceq dépassent légèrement les limites typiques $\leq 0,43$, indiquant une soudabilité plus exigeante

II.5.5 Méthode CEpcm (PCM – Nippon Steel) :

Formule :

$$CE_{pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

X60M :

Acier	Ceq IIW	CE _p cm	CE-BWRA
X60M	0,584	0,243	0,298
X70M	0,600	0,25	0,303

$$0,12 + 0,015 (\text{Si}) + (1,60+0,50+0,50)/20 + 0,50/60 + 0,15/15 = \\ 0,12 + 0,015 + 0,130 + 0,0083 + 0,010 = \mathbf{0,243}$$

$$\mathbf{X70M : Mn=1,70 \rightarrow +0,005 = 0,25}$$

ces résultats sont conformes à l'API, ainsi les tubes présentent une Très bonne soudabilité

II.5.5 Méthode BWRA (via Carbon Equivalent de Breadstreet) :

La formule (via BWRA) mentionne le *CE Breadstreet* :

$$C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}$$

II.5.5 Résumé des résultats :

X60M :

$$0,12 + (1,60/20) + (0,50/15) + (0,65/10) = 0,12 + 0,080 + 0,033 + 0,065 = 0,298$$

$$\mathbf{X70M : Mn=1,70 \rightarrow Mn/20=0,085 \rightarrow Ce \approx 0,303}$$

La soudabilité globale ou constructive : [9]

Elle concerne les problèmes liés au comportement des joints soudés dans une construction, compte tenu de l'influence de facteurs tels que :

- Forme de la pièce, de sa masse et les caractéristiques mécaniques du métal
- Bridage et l'existence de tensions internes
- Possibilités de répartition des déformations à travers la structure
- Conception de la construction soudée et le type de joint

La soudabilité opératoire ou relative : [9]

Elle est liée aux problèmes rencontrés par le soudeur ou l'opérateur, lors de l'exécution du joint par un procédé donné comme par exemple, la grande fluidité d'un bain de fusion dans le

cas des aciers austénitiques pour le soudage en position.

Les impuretés : [9]

Elles évidemment néfastes, on tente de les éliminer lors de l'élaboration des aciers, mais certaines peuvent provenir de l'opération de soudage. L'oxygène (O), l'azote (N) proviennent de l'air ambiant, le soufre (S) et le phosphore (P) proviennent du matériau de base, l'hydrogène (H) provient de plusieurs sources.

a) **L'oxygène** : L'acier se combine avec l'oxygène en formant des oxydes, ce qui diminue la résistance du matériau. Une forte teneur en O₂ diminue la résilience.

b) **L'azote** : Rend l'acier fragile à la température de 200°C. Pendant le soudage, il est source de nitrures et cause de vieillissement.

c) **Le phosphore** : Rend l'acier cassant à basse température. Lors du soudage, il est source de criques, de soufflures et exige parfois l'utilisation d'un enrobage basique.

d) **Soufre** : Tout comme le phosphore, c'est un élément très défavorable, car il agit sur les caractéristiques mécaniques et sur la soudabilité. Il rend l'acier cassant à chaud, abaisse le niveau de résilience et est source de porosités lors du soudage.

e) **L'hydrogène** : Sa présence, au cours du soudage, est due à l'humidité de l'air, à la pollution des pièces à souder (graisse, peinture, rouille, etc ...)- mais le plus souvent à l'humidité dans les enrobages. L'hydrogène provoque la corrosion fissurant.

Soudage des aciers à faible teneur en carbone :

II.5.5 Introduction

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Les techniques de soudage sont en pleine évolution. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés [14].

II.5.5 Les différentes zones d'un assemblage soudé :

Le métal de base :

Il constitue le métal des pièces à assembler. Ces pièces peuvent être en métaux semblables Ou de nature différente. Le métal de base est soumis à un traitement thermique variable suivant le point considéré. De ce fait, il est le siège de transformations d'ordre physico – chimiques.

L'importance des transformations est fonction d'une part du cycle thermique et d'autre part de la nature de l'alliage. Les aciers austénitiques par exemple sont sensible aux changements de phases par précipitations [15].

La zone fondue :

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus ou moins importante d'un métal d'apport. Le métal qui constitue la soudure est appelé métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé (Fig.47)[15].

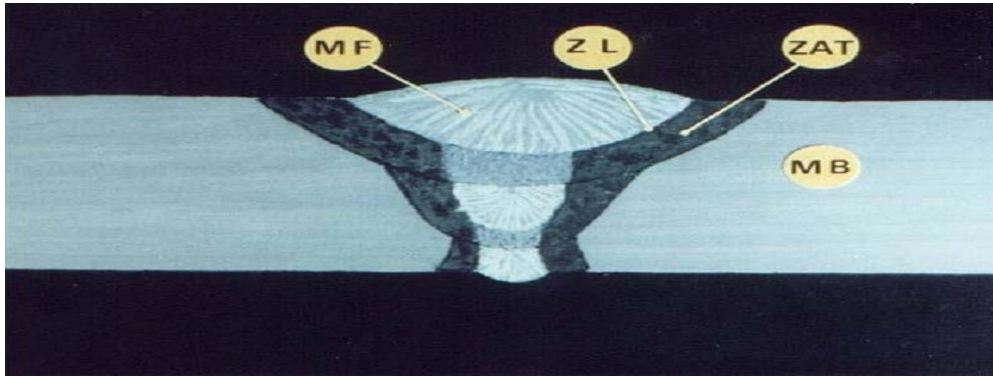


Figure 31: Les différentes zones d'un assemblage soudé.

La zone thermiquement affectée (Z.A.T)

Partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la Microstructure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur du soudage. Dans cette zone, on distingue, dans le cas des soudures exécutées sur des métaux ayant un point de Transformation, une zone de transformation contiguë à la soudure et dans laquelle la température a été suffisante pour entraîner une transformation dite allotropie de la structure et donc une modification des propriétés physiques du métal, sans qu'il y ait eu changement de sa composition chimique [15].

Dans l'autre partie de la zone thermiquement affectée, il n'y a pas eu transformation Allotropique, mais seulement modification, par exemple, de la grosseur de la forme des grains du métal. La zone thermiquement affectée comporte différentes parties, on distingue :

1. zone de surchauffe.
2. zone austénitique.
3. zone partiellement austénitisée [15].

Zone de liaison

Zone marquant la frontière entre la zone fondue et la affectée thermiquement (Z.A.T). En quelque sorte, c'est la limite entre le métal qui été fondu et s'est solidifié et le métal qui est resté à L'état solide au cours de l'opération de soudage (Fig.47)

-3. Les défauts des soudages :

II.5.5 Introduction :

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les Prévenir et les corriger. Ce chapitre vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé.

II.5.5 Les fissures :

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une Extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le Métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes Localisées dépassent la résistance maximum du matériau. la fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique... Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure.

II.5.5 Orientation des fissures :

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de Leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure Longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur [15].

II.5.5 Les fissures longitudinales : dans les petites soudures entre fortes sections sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées. En soudage à l'arc Submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage élevées ou peuvent être liées à des problèmes de porosités non apparentes à la surface de la soudure [15].

Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous (Fig.45).

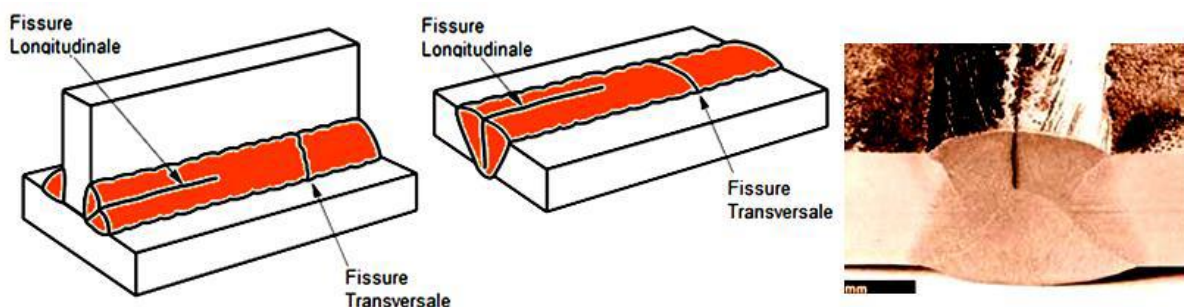


Figure 32: La fissure longitudinale.

II.5.5 Les fissures transversales : sont perpendiculaires à l'axe de la soudure.

Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure.

Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité.

La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal (Fig.46).



Figure 33: La fissure transversale.

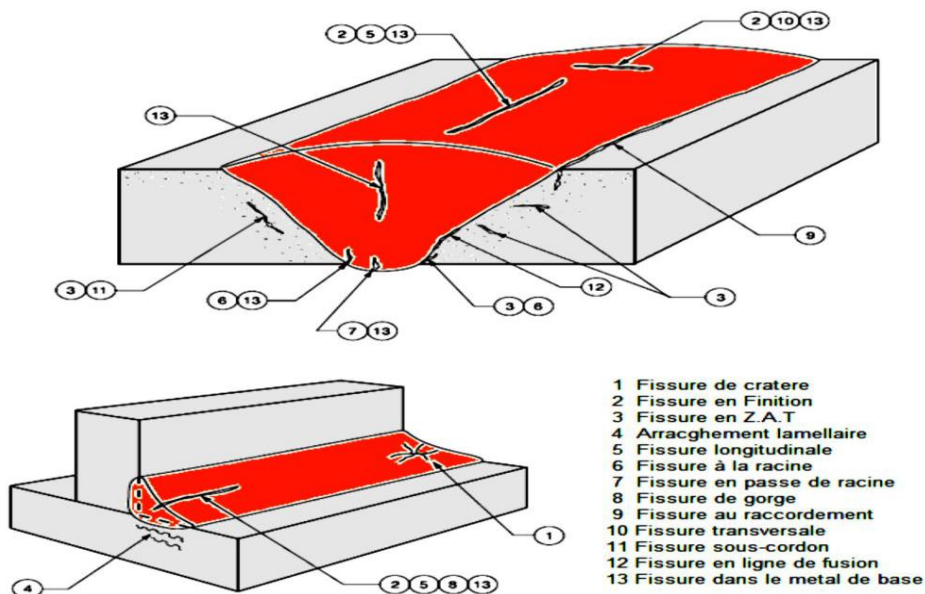


Figure 34: Les types de fissure.

II.5.5 Fissures de Gorge (Throat Cracks) : ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle (Fig.48). Elles sont généralement, mais pas toujours, des fissures à chaud [15].

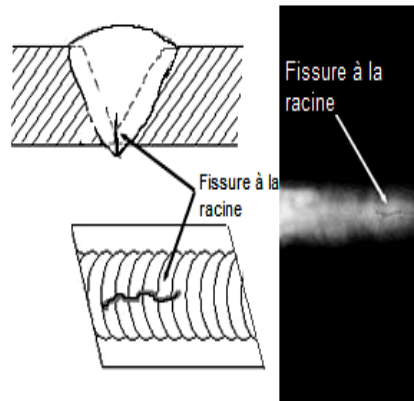


Figure 35: Fissure de Gorge (Throat Cracks).

II.5.5 Fissures de Racine : Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine (Fig.49). Elles peuvent être des fissures à chaud ou à froid.

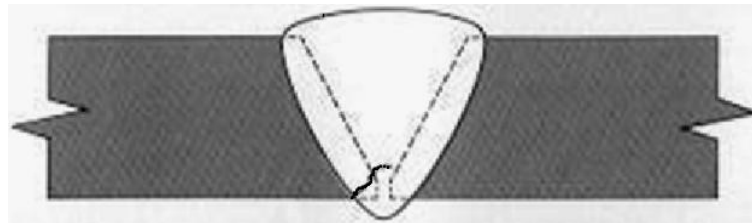


Figure 36: Fissure de Racine.

II.5.5 Fissures de Cratère : Elles se produisent dans le cratère formé à la fin d'un cordon de soudure lorsque la soudure est mal terminée (coupure trop rapide de l'arc). Elles sont parfois appelées fissures en étoile. Les fissures de cratère sont en général des fissures à chaud formant un réseau en étoile. Elles se trouvent le plus souvent dans des matériaux à haut coefficient de dilatation thermique, par exemple l'acier inoxydable austénitique et l'aluminium. Toutefois, l'apparition de fissures peut être minimisée ou évitée par une fin de cordon de forme légèrement convexe avant de retirer l'arc (Fig.50). Des fissures longitudinales peuvent être initiées par une fissure de cratère [15]

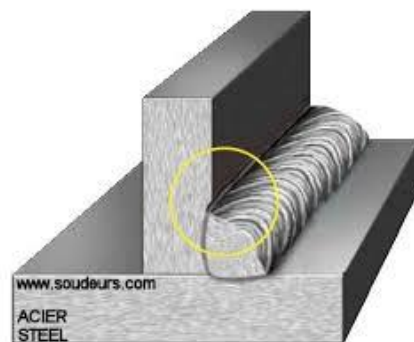


Figure 37:fissure de cratère

II.5.5 Fissures au raccordement : Ce sont généralement des fissures à froid. Elles apparaissent et se propagent depuis l'extrémité de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures au raccordement apparaissent à peu près à la normale de la surface du métal de base. Ces fissures sont généralement le résultat des contraintes de retrait thermique sur la zone affectée thermiquement (Fig.51.). Certaines fissures au raccordement se produisent parce que la ductilité du métal de base ne peut pas s'accommoder aux contraintes de retrait qui sont imposées par l'opération de soudage [15].

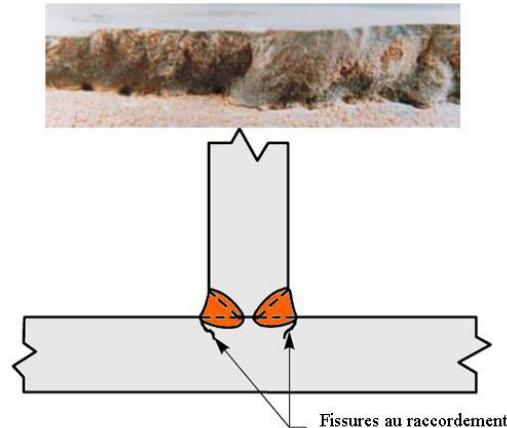


Figure 38: Fissure au raccordement

II.5.5 Fissures Sous – Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement) : Les deux appellations sont utilisées de façon interchangeable. Ce sont généralement des fissurations à froid qui se forment dans la zone affectée par la chaleur du métal de base. Les fissures sous cordon

Peuvent se produire lorsque trois éléments sont présents simultanément :

- (1) Hydrogène.
- (2) Une microstructure de ductilité relativement faible.
- (3) De fortes contraintes résiduelles [16].

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales. Elles se trouvent dans la zone affectée par la chaleur et ne sont pas toujours détectables par des moyens visuels. Elles se rencontrent principalement dans les soudures d'angle, mais peuvent également se produire dans des soudures bout à bout (Fig.52).

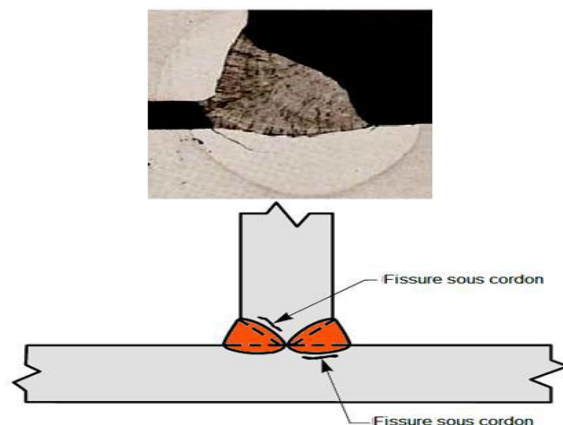


Figure 39: Fissures Sous –Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).

II.5.5 Fissure à chaud (ou de solidification) :

C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure (Soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager Dans le sens longitudinal. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température Élevée (Fig.53).

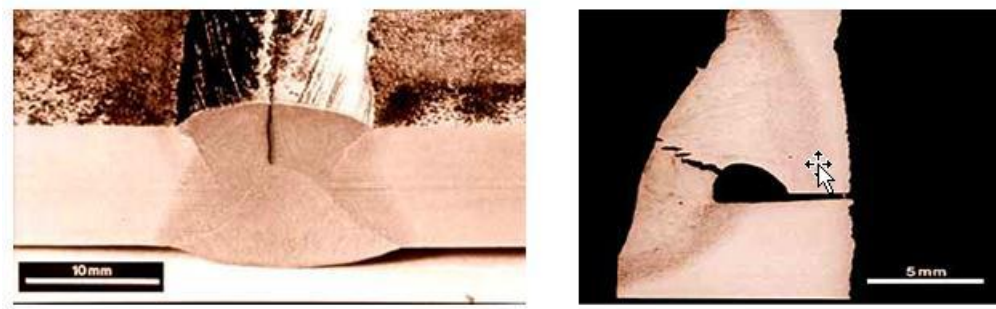


Figure 40: Fissures Sous –Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).

- Causes possibles :

- Retrait transversal exagéré, sur tout pour des cordons avec un rapport profondeur/largeur supérieur à deux (rapport classique pour des procédés avec grande densité de courant tels que le soudage sous flux et le soudage MAG).
- Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD (métal déposé), des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente (Fig.54).
- Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température. C'est un effet défavorable de la préchauffe.
- Écartement trop important entre les parties à assembler dans le cas de soudures d'angle.
- Soudures d'angle avec concavité importante : celles-ci ont parfois une résistance insuffisante pour encaisser des contraintes de retrait normales.
- Transformations allotropiques : on appelle ainsi les modifications de structure cristalline
- Qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier; étant donné que ces Transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles.

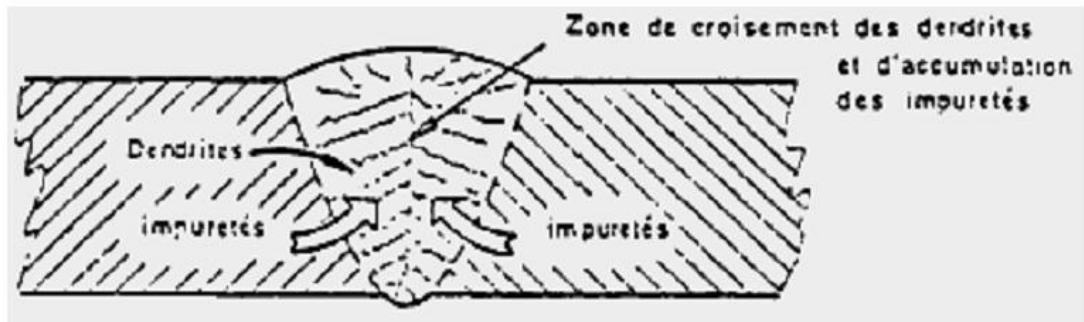


Figure 41: Évolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement

Méthodes de détection :

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie.

Méthode de réparation :

Éliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure
Et réparer par soudage.

Mesures préventives :

- Adapter les paramètres de soudage afin de s'approcher d'un rapport profondeur-largeur 1/1, signifie une pénétration équilibrée,
- Teneur en P et S dans le métal de base à limiter à 0,05 % pour les deux éléments.
- Limiter l'écartement des assemblages.
- Adapter le régime thermique afin d'éviter un retrait transversal important.

II.5.5 Fissures à froid (fissures d'hydrogène) :

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après le soudage (Fig.55) [15]

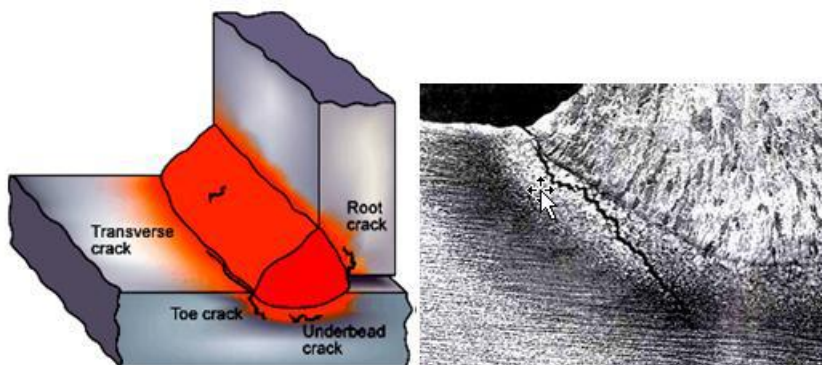


Figure 42: Fissure à froid (fissure d'hydrogène).

Causes possibles : La diffusion de l'hydrogène du métal de base vers la zone affectée thermiquement qui a une Structure de trempe et qui est donc fissurant.

Ces porosités d'hydrogène ont une pression élevée et peuvent donc être à la base d'une fissure. L'hydrogène peut venir de l'humidité dans ou sur les produits de soudage ou d'autres Produits contaminants tels que la peinture, l'huile ou des oxydes.

La probabilité de fissuration s'augmente avec la hausse du carbone équivalent et de l'épaisseur. De grands écartements, un régime thermique faible ou manque de préchauffe peuvent Également être des éléments.

II.5.5 Fissuration lamellaire (ou l'arrachement lamellaire) : [15]

L'arrachement lamellaire (ou fissure lamellaire) peut se produire sous la soudure

Spécialement dans les tôles laminées à faible ductilité dans le sens de l'épaisseur.

Nous décrirons ici, les traits caractéristiques, les principales causes, ainsi que les bonnes Pratiques pour minimiser le risque d'arrachement lamellaire [15].

- Identification :

Aspect Visuel : Le principal trait caractéristique de l'arrachement lamellaire est qu'il se produit dans les Soudures en T et en angle et qu'il se situe dans le métal de base parallèlement à la ligne de fusion de la soudure et de la surface de la tôle (Fig.56). Les fissures peuvent apparaître au bord de la pénétration de la soudure mais sont toujours associées avec des points de grande concentration de contraintes.

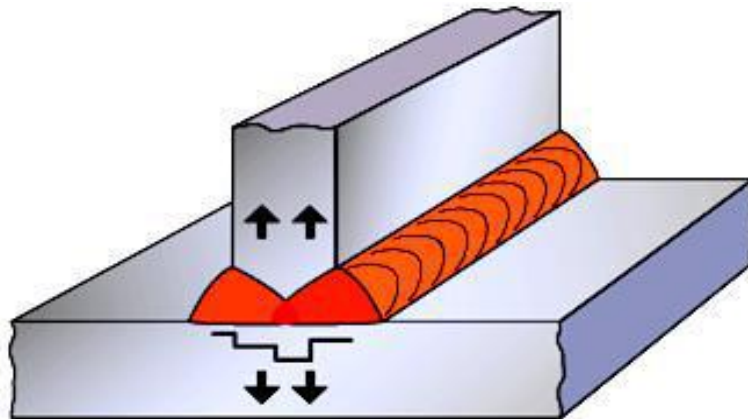


Figure 43: Arrachement lamellaire dans un joint en T.

II.5.5 Les défauts de soudage :

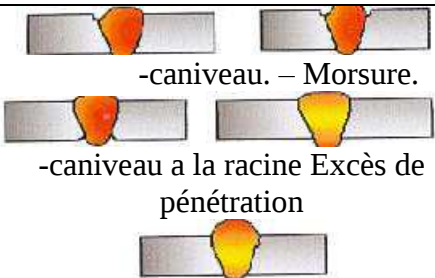
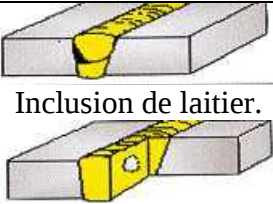
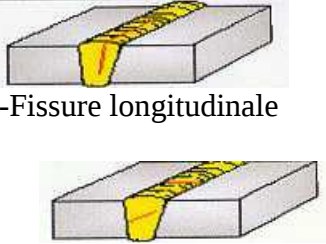
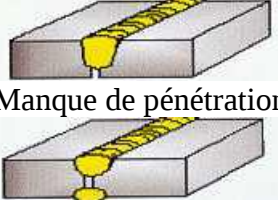
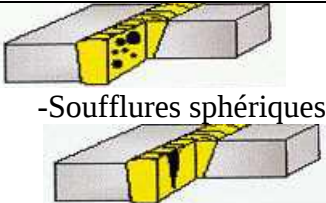
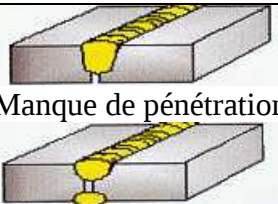
Types de défauts	Descriptions	Illustration.
Défauts de surfaces	Un creux irrégulier à la surface du cordon juste au contact du métal d'apport et du métal de base.	 -caniveau. – Morsure. -caniveau a la racine Excès de pénétration -Surépaisseur excessive.
Inclusions solides	Restes de laitier ou d'autres matières étrangères au joint.	 Inclusion de laitier. -Inclusion métallique
Fissurations.	- Les fissures sont des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur/largeur. - Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation.	 -Fissure longitudinale -Fissure transversale
Manque de fusion	C'est l'absence du métal à la racine du chanfrein.	 -Manque de pénétration. -Manque d'interprétation.
Inclusions gazeuses.	Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous forme : -Des soufflures sphériques. -Des soufflures vermiculaires se disposant les unes à la suite des autres.	 -Soufflures sphériques. -Soufflures vermiculaires.
Manque de pénétration.	C'est l'absence du métal à la racine du chanfrein.	 -Manque de pénétration. -Manque d'interprétation.

Tableau. I.1 : types de défauts des joints soudés.[17].

Méthodes d'identification des défauts :

Le contrôle non destructif est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'essais non destructifs (END) ou d'examens non destructifs.

Comme il existe plusieurs méthodes de contrôle non destructif.

II.5.5 Généralités sur le contrôle non destructif :

Le contrôle non destructif (CND) consiste à rechercher la présence éventuelle de défauts au sein des matériaux constituant les objets ou parties d'objets à tester par l'utilisation de techniques diverses, sans attenter à l'intégrité de ceux-ci.

La mise en œuvre d'un contrôle non destructif demande la connaissance :

- Des possibilités et limites des procédés utilisables,
- De l'histoire de la pièce (forme et mode de fabrication),
- Des défauts recherchés (nature, position, dimensions,...),
- Des propriétés physiques du matériau contrôlé.

Ces connaissances permettent de choisir :

- La méthode de contrôle la mieux adaptée,
- La procédure permettant :
 - ✓ D'observer les défauts recherchés avec le maximum de chances de détection,
 - ✓ De quantifier de façon la plus fidèle ces défauts.

II.5.5 Mise en œuvre des contrôles non destructifs :

La mise en œuvre correcte de contrôles non destructifs comporte trois volets :

- La qualification des opérateurs,
- Le choix des équipements,
- La définition des modes opératoires.

II.5.5 Principaux contrôles non destructifs :

Les contrôles non destructifs peuvent se classer en trois catégories :

- ❖ Les méthodes dites de surface pour lesquelles l'anomalie est localisée, soit en surface, soit dans une zone proche de la surface (Examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, les courants induits),
- ❖ Les méthodes dites volumiques pour lesquelles l'anomalie est localisée dans le volume de la pièce (Ultrasons, rayonnements ionisants),
- ❖ Les méthodes complémentaires (Étanchéité, thermographie, émission acoustique).

PROCEDE	DEFAUTS DE CIBLLES	AVANTAGES	LIMITES
Examen visuelle	-défauts de surface (manque de pénétration, caniveaux) -forme de cordon incorrect	-contrôle permanent pendant le soudage -peu couteux	-défauts de surface -pas de documents
Ressuage	-défauts de surface invisibles a l'œil (fissures débouchant)	-simple d'emploi -peu couteux	- défauts de surface -pas de documents d'archive -interprétation délicate -non utilisable sur matériaux poreux
Magnétoscopie	-défauts de surface (fissures, manque de pénétration,...)	-méthode sensible et simple -peu couteux	-défauts de surface -interprétation délicate -utilisable que sur matériaux ferromagnétiques
Rayons ionisants	-défauts volumiques porosité, inclusions, manque de pénétration,	-détection de défauts internes -résultats archivables	-matériel couteux -opérateur qualifié -sensibilité fonction de l'orientation du défaut

Les Essais Mécaniques

II. Les contrôles effectués

II.5.5 Contrôle des soudures :

C'est un examen effectué couramment en cours de fabrication dont le but de prélever la géométrie du cordon de soudure et pour déterminer le désaxage entre la soudure intérieure et l'extérieure et pour déterminer la surépaisseur de la soudure intérieure et l'extérieure.

II.5.5 Procédure de la macrographie :

- Préparation de l'éprouvette.
- Un polissage de la surface (on utilise un disque de polissage).
- Une attaque chimique (avec la norme API 5 L).
- Prise de photo (on utilise un appareil photo de haute qualité).

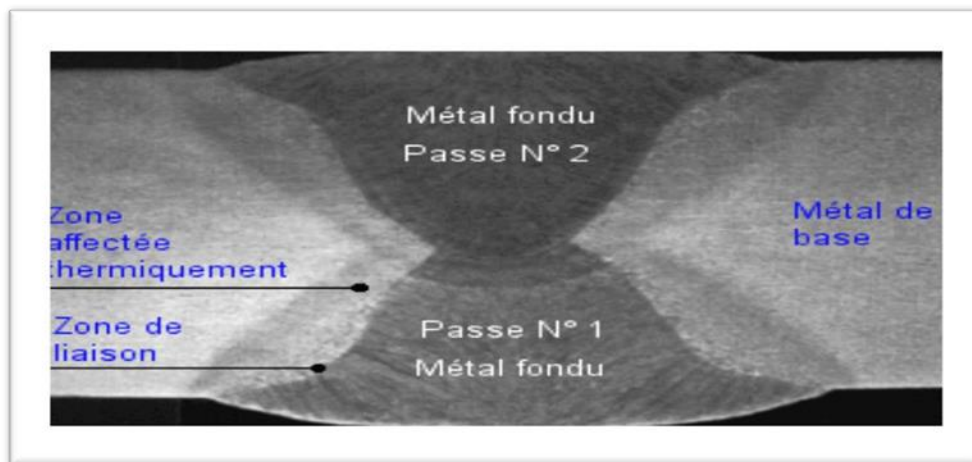


Figure 44 : Micrographie de la zone de soudure [01]

:

On fait appel à cette technique lorsque les problèmes métallurgique se présentent telle que les fissures, criques, soufflures qu'il convient de solutionner en étudiant la structure cristalline du métal.

Les essais seront effectués sur des échantillons découpés à travers les tubes testés.

❖ Essais de traction :

Tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus Fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que : La limite élastique, La résistance à la rupture, L'allongement après rupture et enfin Le coefficient de striction. Ces essais sont effectués suivant les prescriptions de la norme API 5 L 43 édition.



Figure 45 ESSAI DE TRACTION [01]



Essai de Dureté

L'essai de dureté sert à caractériser la résistance à la déformation plastique d'un matériau non fragile à l'aide d'un essai simple et rapide. La dureté est définie comme la résistance opposée par l'éprouvette à la pénétration d'un corps plus dur.

Le procédé d'essais de dureté utilisé dans laboratoire est la dureté selon Vickers(HV10).

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre face égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carrée, on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carrée à l'aide d'un appareil optique.

- ✓HV : dureté Vickers
- ✓ d_1 et d_2 : (mm)
- ✓F : charge d'essai (N)
- ✓g : accélération de la pesanteur

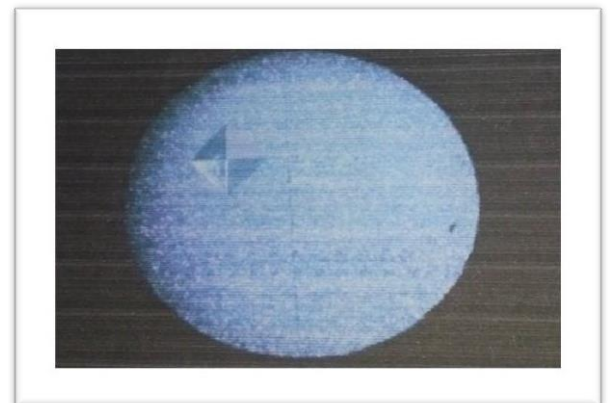


Figure 46 : Essai De Dureté [01]



Essai de Pliage

- L'essai consiste à exercer sur une éprouvette, à température ambiante, une déformation plastique par pliage.
- L'essai de pliage est réalisé lui aussi sur la machine de traction si le vérin de la machine fonctionne aussi en compression

L'essai de pliage se fait sur la même machine de traction consiste à poser l'éprouvette sur deux appuis cylindrique. Après y avoir déposé l'éprouvette, on commence l'essai par l'alimentation du poste de commande, qui fournit une pression hydraulique à un cylindre qui, à son tour, applique une force de pliage sur l'éprouvette.

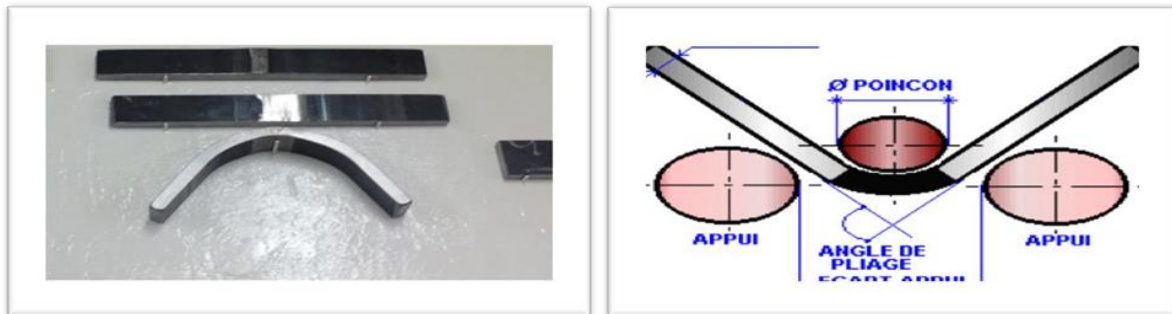


Figure 47 : Essai de Pliage

❖ Essai de Résilience :

L'essai de résilience a pour objectif de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture, bien que la résistance à la rupture se mesure traditionnellement, un essai de traction classique.

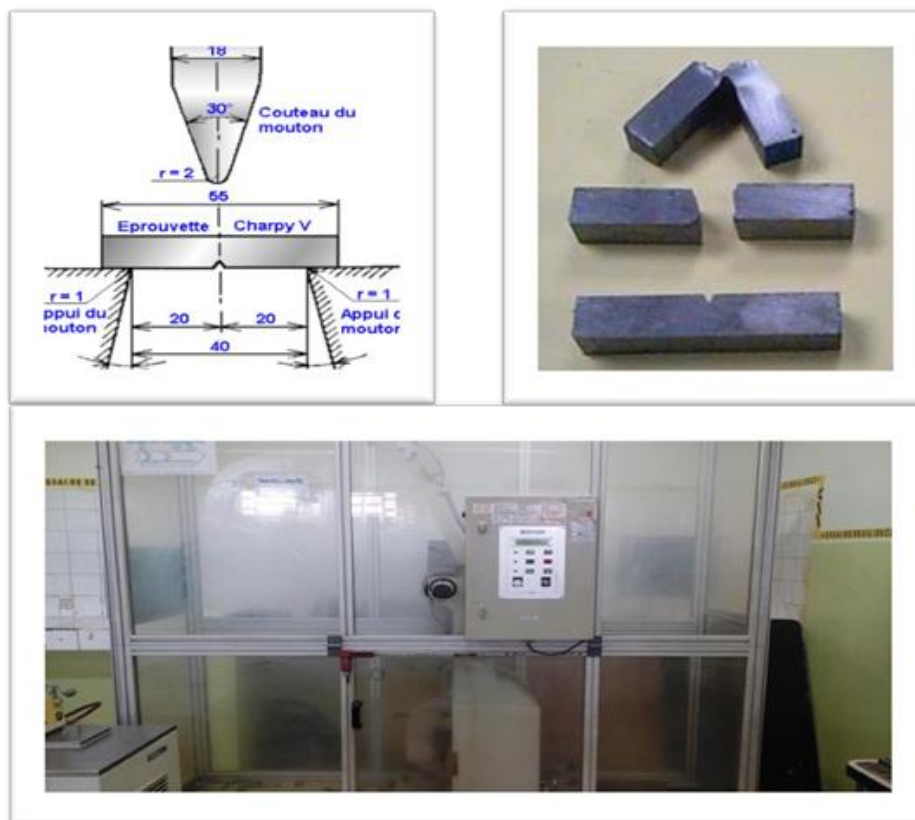


Figure 48 Résilience Des Matériaux [01]

Procédé de fabrication :

Le tube acier soudé en spirale est obtenu à partir de bobines d'acier laminées à chaud de largeur variantes de 1100 à 1800 mm .Enroulé en spirale et simultanément soudé par arc immergé sous flux en deux passe (extérieure et intérieure)

Le formage du tube est scrupuleusement contrôlé, du point de vue diamètre, interpénétration des soudures et absence de défauts sur métal et dans la soudure, le tube est acheminé vers les installations de parachèvement et de finition suivant les spécifications de référence et les exigences du client.

Machine à souder en spirale

La machine à souder en spirale sert à fabriquer des tubes à partir des bandes de différentes largeurs et épaisseurs dévidées des bobines. Ces bobines sont roulées et sont en suit soudées en spirale intérieurement et extérieurement selon le procédé de soudure sous flux.

II.5.5 La machine à souder en spirale se compose de dix parties interdépendantes :

- 1- Partie réserve bobines
- 2- Partie de bobinage (dévidoir)
- 3- Partie cisaille guillotine
- 4- Partie guidage latéral de la bobine
- 5- Partie cylindre dresseur (planeuse)
- 6- Entraînement principal
- 7- Partie cisaille de rives et coupe chute
- 8- Dispositif de fraisage
- 9- Dispositif de brossage
- 10- Partie formage.



Figure 49 Les bobines en acier [01]

II.5.5 La partie de réparation des bandes :

S'étend du dispositif de déroulage des bandes dévidées jusqu'aux rouleaux de l'entraîneur. Dans cette zone la bobine est tirée et passe par différents stades de traitement. Elle est dressée guidée et fraisée des deux cotés par la cisaille circulaire de rognage qui fait ensuit. guidage du tube), le support avec la traverse pour l'installation de soudage extérieur et le control aux ultrasons, et le dispositif de descente du tube.



Figure 50 La réparation des bandes [01]

L'élimination des bords de laminage est liée à la mise au point d'une largeur constant de bande. Ensuite à l'aide des outils raboteurs et de brosse de nettoyage, on prépare les rives pour la soudure.

La liaison des bobines par un système de rabotage permet d'obtenir des bandes sans fin. L'opération se fait comme suit :

- Couper les languettes de fin de bande.
- Aligner les rives.
- Souder.



Figure 51 : Machine à couper début de bande [01]

Pendant cette phase de l'usinage, la soudure de tube est interrompue, pendant un laps de temps. Tous les éléments de la partie préparation des bobines sont boulonnés fixés sur le châssis de base de la machine, celui-ci repose sur des galets et il est pivoté dans la position correspondante (angle d'entrée) selon la largeur et le diamètre du tube.

Dans la cage de formage, la bande est formée en tube selon le principe de la cintruse à rouleaux multiples. Les rives qui convergent dans la cage de formage sont soudées intérieurement d'abord, extérieurement ensuite. Sur un châssis orientable pour le réglage de la fente de soudure sont montées la lunette de commande (dispositif de guidage du tube), le support avec la traverse pour l'installation de soudage extérieur et le control aux ultra-sons, et le dispositif de descente du tube.

II.5.5 . Fonctionnement de la machine à souder en spirale :

- Conformément à la largeur de la bande selon l'échelle graduée, la chaise support de la bobine se trouve dans la position requise transversalement à la direction du déroulement de la bobine (bande).
- le chariot récepteur de bobine est en mouvement , le dispositifs de serrage se trouvant face à face à la machine .

- la bobine étant dans la machine, une fois épuisée, il est procédé à la soudure de l'extrémité (début) de la bande de la nouvelle bobine, sur l'extrémité (fin) de la précédente.

La planeuse, destinée au réglage précis des angles, est munie d'un guide-bande ; quant à la cisaille circulaire, elle est couplée à une râcheuse pour assurer la découpe.

Le support de raclage est muni d'outils destinés au nettoyage des rives. Une brosse assure le nettoyage à la fois des rives et des surfaces de la bande.

Le cylindre d'entraînement, le galet de préformage des rives ainsi que la barre de guidage sont préréglés en fonction de l'épaisseur et de la largeur de la bande.



Figure 52 : Tube préparé à la machine à souder en spirale

II.6.1.1 Préparation de la ligne de formage et de soudage :

- La cage de formage, la tête de soudure extérieure avec dispositifs de réglage, ainsi que la lunette de commande réglable pour l'ouverture de la fente de soudure sont positionnées.
- Le dispositif de contrôle par ultrasons, le chevalet de support du tube, ainsi que le chariot d'oxycoupage sont préréglés en fonction du diamètre du tube et de l'angle d'inclinaison requis.

Réglages généraux et alimentation :

- Le châssis de la machine est ajusté sur l'angle d'entrée de la bande.
- Un arrêt automatique est activé sur le pupitre de commande n°1.

- Les réservoirs de flux pour les soudures spirales et transversales sont remplis.
- Les tambours de fil à souder (intérieur et extérieur), ainsi que ceux destinés au rabotage des bandes, sont équipés de bobines de fil prêtes à l'emploi.

Fluides et alimentation auxiliaire :

- Les sources de propane et d'oxygène pour les dispositifs de rabotage et d'oxycoupage sont raccordées, et la veilleuse du chariot d'oxycoupage est allumée.
- L'air comprimé est branché pour :
 - le soufflage entre le racleur et la brosse de surface ;
 - le nettoyage avant les cisailles circulaires.
- Le raccordement de l'eau de refroidissement est également réalisé pour :
 - le dispositif de contrôle par ultrasons ;
 - l'eau de couplage utilisée pour le refroidissement du support de soudure intérieure.

II.2.62.1 Entretien de la machine à souder en spirale :

Il est indiscutable que le fonctionnement et la longévité de l'équipement dépendant d'un entretien minutieux et du soin entrepris à cet effet il y a lieu de :

- nettoyer l'équipement une fois par semaine.
- graisser, après le nettoyage hebdomadaire, les broches coulisses, vis en mouvement.
- rincer proprement les engrenages et les paliers lors de renouvellement de la graisse, avant le nouveau remplissage.
- n'employer que les huiles et les graisses indiquées par le constructeur.
- Les travaux d'entretien ne doivent être entrepris que lorsque la machine est mise hors circuit.
- Mettre l'équipement hors circuit à l'aide de l'interrupteur à clé et retirer la clé.

II.4 Nettoyage des tubes:

Les étapes de nettoyage de tube de flux de soudage

- Le tube est maintenu en position entre deux têtes de serrage, montées sur une barre métallique qui pénètre à l'intérieur du tube pendant sa rotation.
- Des dispositifs de fin de course sont installés sur le châssis de sortie, permettant de détecter automatiquement la longueur souhaitée des tubes.

La commande du processus est synchronisée avec :

- le sens de déroulement de la bande (en amont).
- et le sens de déplacement des tubes (en aval).

II.5 Contrôle de tube :

II.5.3 Contrôle visuel :

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général. L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect réhabilitaires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. [2].



Figure 53 : Contrôle visuel [01]

II.5.3 . Radioscopie (rayon X) :

Il s'agit d'une installation équipée d'un tube à rayons X monté sur une barre métallique, qui pénètre à l'intérieur du tube pendant que celui-ci tourne de manière hélicoïdale.

Ce mouvement permet de transmettre l'image en temps réel sur un écran. Grâce à ce dispositif, le contrôleur peut détecter les défauts déjà signalés ainsi que d'éventuelles anomalies non repérées auparavant. En fonction de l'état de la soudure, il peut décider soit de valider la pièce pour la réception finale, soit de la renvoyer pour réparation en cas de soudure non conforme. Si le défaut détecté est irréparable (comme un dédoublement), le tube est alors orienté vers le tronçonnage pour découpe.



Figure 54 : Radioscopie (rayon X) [01]

II.5.3 Installation des bancs hydrostatiques :

Chaque tube est soumis à une épreuve hydraulique, le tube est bloqué entre deux têtes remplies d'eau et soumis à l'aide de pompe haute pression à la pression prescrite, qui correspond à une sollicitation qui voisine la limite élastique. La pression sur les têtes nécessaire à l'étanchéité des extrémités de tube est maintenue pendant un temps fixé.

II.5.4 . Examen ultra-sons :

Le contrôle qualité interne de la soudure spirale est effectué immédiatement après l'opération de soudage, à l'aide d'un système automatisé. Ce contrôle repose principalement sur deux types d'examens par ultrasons :

II.5.5 . Contrôle de la soudure proprement dit :

Ce premier examen permet de vérifier la qualité de la soudure spirale en détectant les défauts internes tels que les fissures, les manques de fusion, les inclusions de laitier ou les porosités. L'onde ultrasonore est envoyée à travers la zone soudée, et les signaux réfléchis permettent d'identifier toute anomalie.

II.5.5 Détection du dédoubleur (laminassions internes) :

Le second contrôle par ultrasons a pour objectif spécifique de détecter les **dédoubléments**, c'est-à-dire des défauts internes tels que le **délaminage** ou la **séparation du métal** au sein de la bande d'acier utilisée.

Ces anomalies peuvent s'avérer critiques, car elles compromettent la résistance mécanique du tube. L'examen est réalisé sur l'ensemble de la largeur du tube, afin de vérifier l'intégrité de la matière de base.

Ces deux examens sont complémentaires et essentiels pour garantir que les tubes spiraux sont conformes aux exigences de qualité et de sécurité avant leur mise en service.

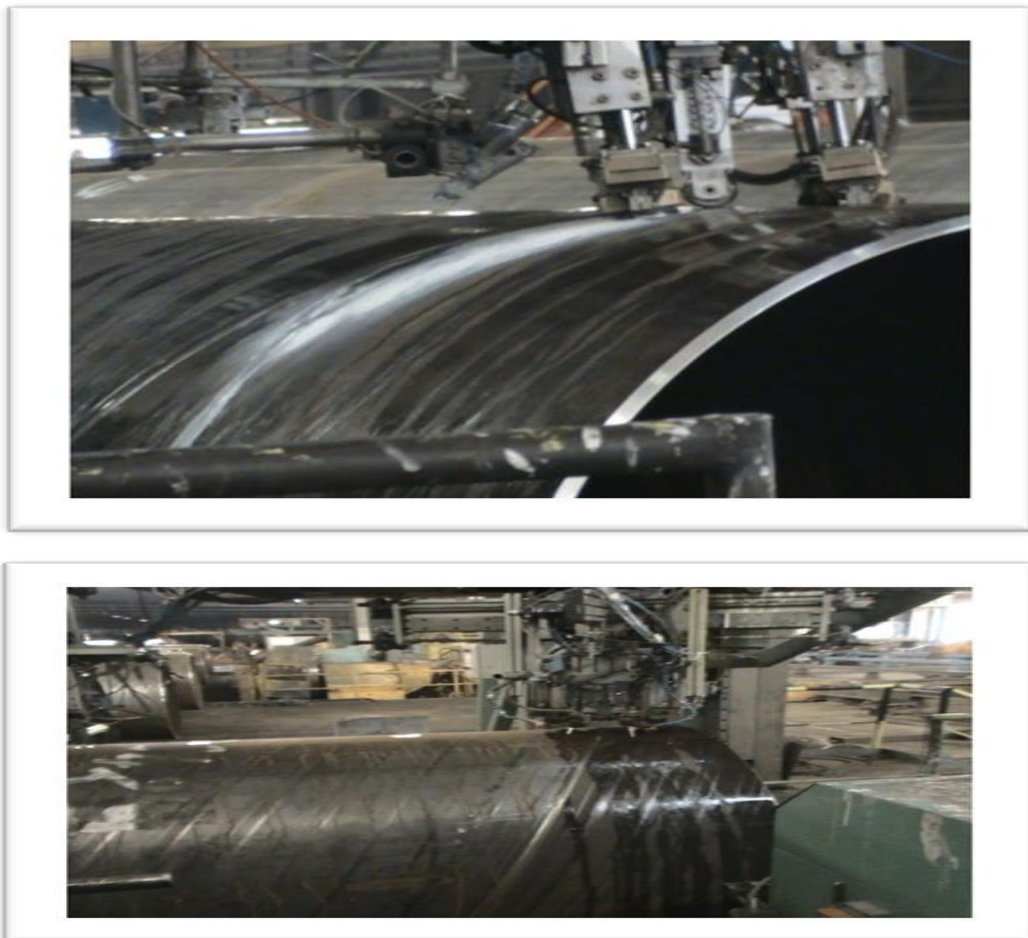


Figure 55 Détection du dédoubleur (laminassions internes) : [01]

II.5.5 . Examen de soudure :

Le contrôle par ultrasons est réalisé à l'aide de palpeurs angulaires. Pour détecter les défauts longitudinaux, deux palpeurs sont utilisés, dont les faisceaux ultrasonores sont orientés perpendiculairement à l'axe du défaut afin d'en maximiser la détection.

Pour un contrôle complémentaire des défauts transversaux (ou verticaux), on peut utiliser des palpeurs spéciaux qui dérivent une partie du faisceau ultrasonore et l'orientent sous un angle de 45° par rapport à l'axe de la soudure.

Une autre méthode consiste à employer quatre palpeurs, permettant ainsi une détection simultanée des défauts longitudinaux et transversaux. Dans toutes les configurations, les palpeurs sont positionnés symétriquement de part et d'autre de la soudure, et sont guidés avec précision à l'aide de dispositifs de centrage assurant leur alignement avec le joint soudé.

II.5.5 . Examens des dédoubleurs :

L'inspection des dédoubleurs est réalisée à l'aide d'un contrôle par ultrasons utilisant des ondes longitudinales. Cet examen s'effectue sur la surface externe du tube une fois celui-ci terminé.

Pour ce type de contrôle, on utilise généralement des palpeurs émetteurs-récepteurs, intégrant un cristal récepteur. L'onde ultrasonore est transmise à travers une fine couche d'eau (fente d'eau), permettant l'apparition d'une série d'échos sur l'oscillogramme, correspondant à la réflexion de l'onde sur la paroi opposée du tube.

Lorsqu'une dédoubleure est présente sur le trajet des ondes, le temps de propagation jusqu'au premier écho de la paroi opposée est allongé. Grâce à un repère visuel sur l'écran, cette anomalie peut être automatiquement identifiée. Avant l'apparition du premier écho de la paroi opposée, un signal de réflexion peut indiquer la présence d'une dédoubleure avancée.

Si l'intensité du signal dépasse un seuil prédéfini dans cette zone, une alerte est déclenchée. Ce principe permet de contrôler efficacement les extrémités des tubes, le matériau de base, ainsi que les zones situées à proximité de la soudure.

Lors de l'examen du matériau de base (entre les soudures), le palpeur effectue un mouvement axial oscillant sur le tube, pendant que ce dernier tourne de manière hélicoïdale sous le dispositif. Ainsi, le matériau est sondé presque perpendiculairement au sens de laminage, c'est-à-dire dans la direction longitudinale des éventuelles dédoubleures.

Les signaux détectés sont automatiquement marqués sur le tube, à l'aide de pistolets de peinture colorée, de la même manière que pour les autres installations automatiques de contrôle par ultrasons. Les zones suspectes, notamment autour des soudures, sont ensuite soumises à un contrôle complémentaire par rayons X.

II.5.5 . Contrôle radiographique :

Le contrôle radiographique repose sur une installation similaire à celle utilisée en radioscopie, à la différence que l'image n'est pas transmise en temps réel sur un écran, mais enregistrée sur un film radiographique. Après exposition, ce film est développé afin d'analyser en détail la qualité de la soudure.

Ce type de contrôle permet d'examiner minutieusement la zone soudée pour vérifier l'absence de défauts internes, tels que les inclusions, porosités, fissures ou manques de fusion. Il permet également de confirmer que le tube n'a subi aucun endommagement ni altération au niveau de la soudure.

Le film développé est ensuite interprété par un contrôleur qualifié, qui détermine si le tube est conforme ou s'il nécessite une réparation ou un retraitement.



Figure 56 Contrôle radiographique : [01]

Après fabrication et contrôle si le tube est de bonne qualité, ce dernier passe à l'étape suivante (le revêtement), le cas contraire, il est orienté pour la réparation des défauts

Le transport et la manutention des matériaux au sein de l'unité de production sont assurés par différents équipements adaptés aux étapes du processus industriel :

- **Ponts roulants** : utilisés pour le déplacement des bobines (matières premières) ainsi que des produits finis.
- **Convoyeurs** : installés entre chaque étape de production, ils assurent le transfert des tubes (produits semi-finis) d'une station à une autre.
- **Transport final** : une fois la production achevée, les tubes sont chargés et transportés vers les clients par camions.

RESULTATS & INTERPRETATION

III . Chapitre III

Propriétés Mécaniques selon API5L:

Caractéristiques API5L	EPAISSEUR (mm)	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	A(%)	Re/Rm
X70	5-25	485-605	570-605	≥ 18	0.90
X60	5-20	415-520	520	≥ 19	0.80

Tableau II.1. Caractéristiques mécanique de l’X70 et X60 selon l’API5L

Avec :

- Re : la limite d’élasticité.
- Rm : la résistance à la traction.
- A% : le pourcentage d’allongement après rupture.

Propriétés métallurgiques (Composition chimique) :

Elle est obtenue par l’analyse par spectrométrie (mesure d’onde d’élément)

L’acier X70 contient une faible teneur de carbone (0.085).

La composition chimique est détaillée au (tableau II.2). [API 5L]

Élément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu
Value	0.085	0.321	1.52	0.002	0.006	0.033	0.018	0.003	0.038	0.003	0.013
Element	Nb	Ti	V	W	Sn	B	Fe	V+ Nb	S+D	C eq	-
Value	0.05	0.007	0.063	0.003	0.604	0.001	97.8	-	0.0073	0.36	-

Tableau. II.2. Composition chimique de l’acier X70

Introduction :

La réparation d'un pipeline consiste à retirer une portion défectueuse du cordon de soudure afin de la remettre en état par une nouvelle opération de soudage. Ce processus implique un apport thermique important, dont les effets peuvent altérer la zone concernée, tant au niveau de sa microstructure que de ses propriétés mécaniques.

Le cordon de soudure d'un pipeline comprend généralement trois zones distinctes :

- le **métal de base (MB)**,
- la **zone affectée thermiquement (ZAT)**,
- et la **zone de soudure (SE)**.

Ces zones peuvent réagir différemment aux cycles thermiques engendrés par les réparations successives.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des opérations de réparation sur les propriétés mécaniques locales du joint soudé.

- sonder la résistance locale à la déformation plastique,
- identifier les variations microstructurales entre les zones,
- et comparer l'effet de chaque cycle de réparation (R1, R2).

R1 : la périmier réparation, R2 : deuxième réparation

Procédure de réparation :

De manière générale, une procédure de réparation suit les étapes suivantes :

1. Localisation précise du défaut à corriger.
2. Meulage du cordon de soudure jusqu'à atteindre et éliminer la zone défectueuse.
3. Recharge de la soudure, en respectant strictement les conditions fixées dans le mode opératoire de réparation.
4. Contrôle de la qualité du joint réparé par un nouvel examen radiographique.

Dans le cadre de cette étude, la réparation est envisagée comme un processus répétitif. Elle consiste à meuler partiellement le joint soudé selon une profondeur déterminée, tout en conservant la forme originale du chanfrein et en préservant partiellement la soudure existante Figure 57.

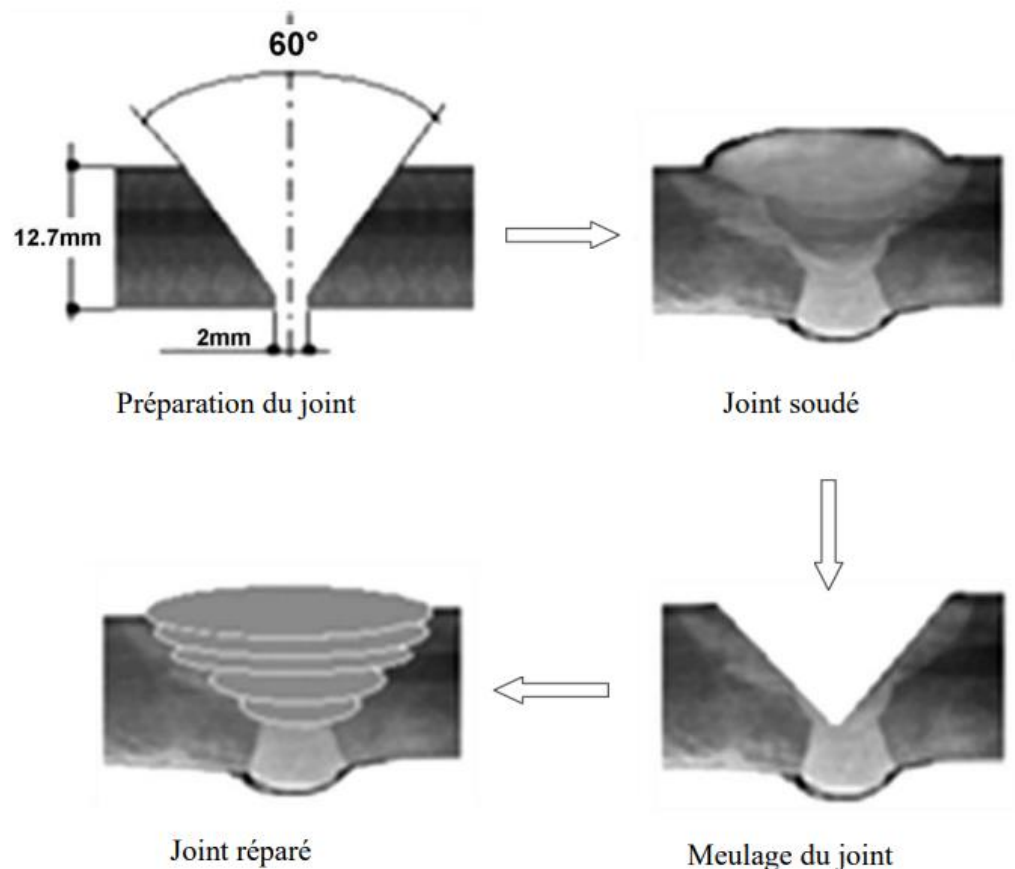


Figure 57: Séquences de la procédure de réparation [9].

Les réparations sont notées comme suit :

S : soudure initiale, **R1** : première réparation, **R2** : deuxième réparation.

- Une procédure de réparation débute par la localisation précise de la zone à corriger, qu'il s'agisse d'un défaut de surface (type caniveau, reprise, surépaisseur, etc.) ou d'un défaut interne (inclusions, soufflures, fissures, etc.).
- Pour cela, plusieurs techniques de contrôle non destructif (CND) peuvent être utilisées. Parmi les plus fiables figure le contrôle radiographique par rayons X ou gamma, reconnu pour sa grande efficacité dans la détection des défauts internes au sein d'un joint soudé.
- Le résultat de ce contrôle se présente sous la forme d'un film radiographique, qui met en évidence les éventuelles discontinuités ou anomalies dans le cordon de soudure. La figure 58 illustre, à titre d'exemple, le film radiographique obtenu pour la soudure initiale S.

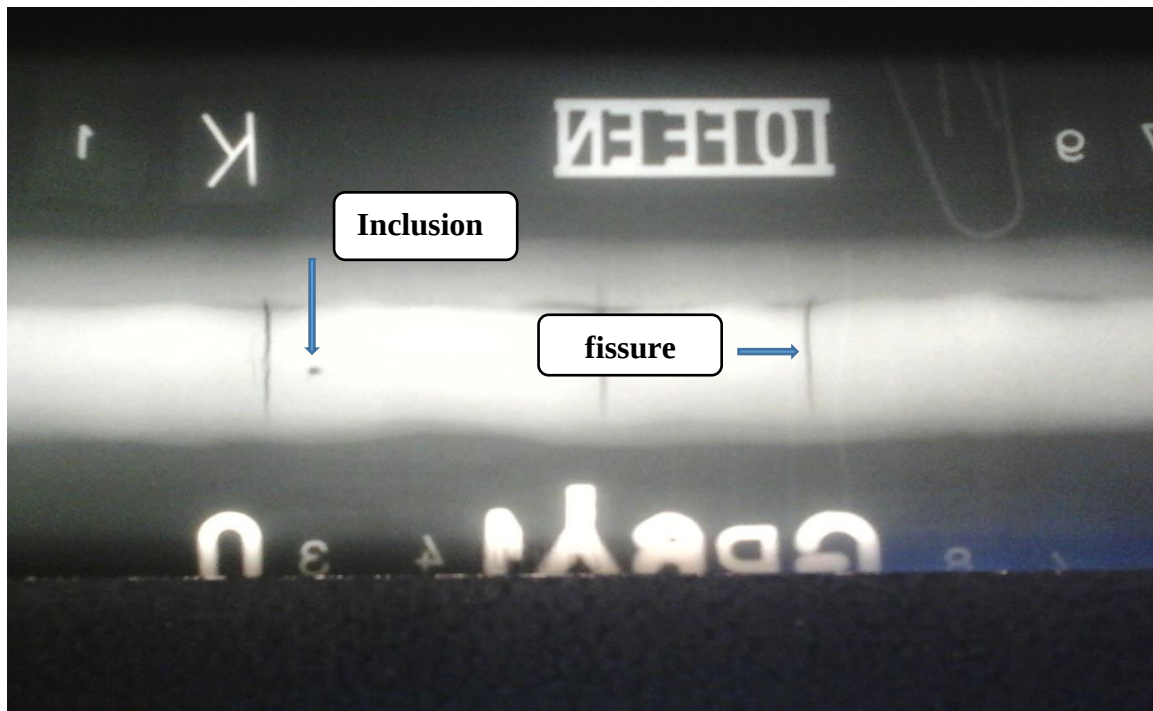


Figure 58: Film radiographique de la soudure initiale.

L'examen radiographique de la soudure initiale a mis en évidence la présence de plusieurs défauts internes dans la zone fondue du cordon de soudure. Parmi ces défauts, on distingue clairement :

- Une fissure, non tolérée par aucune des normes en vigueur,
- Ainsi que de nombreuses porosités, dont l'origine est attribuée au non-respect des conditions du mode opératoire de soudage, en particulier le mauvais étuvage des électrodes.

Conformément à la norme ASME Section IX, les porosités sont strictement interdites, et nécessitent donc une opération de réparation.

Toutefois, selon la norme API 1104, une certaine tolérance est admise :

- Le diamètre de la plus grande porosité ne doit pas dépasser 2 mm,
- En cas de nid de soufflures, la surface totale occupée par ces dernières ne doit pas excéder 13 mm².
-

III.5.5 Nid de soufflures

Un nid de soufflures (également appelé *amas de porosités* ou *cluster de porosités*) désigne un groupe de cavités gazeuses formées pendant la solidification du métal fondu lors du soudage.

Acceptabilité :

Selon la norme API 1104 :

Un nid de soufflures peut être toléré uniquement si :

- Sa surface totale ne dépasse pas 13 mm²,
- Il respecte les distances minimales entre défauts,
- Aucune fissure associée n'est détectée.

Une fois la zone défectueuse localisée, le cordon de soudure est meulé avec précision jusqu'à élimination complète du défaut (voir Figure 59). On procède ensuite à l'opération de rechargement selon les prescriptions définies dans la procédure de réparation. Le résultat final de cette intervention est présenté à la Figure 60.



Figure 59:Meulage d'un cordon de soudure



Figure 60:Rechargement du cordon de soudure.

L'examen radiographique effectué après la première opération de réparation (Figure 61) a révélé la présence de porosités localisées le long du cordon de soudure.

Bien que réduites en nombre et en intensité, ces discontinuités persistent, ce qui justifie la nécessité d'une seconde intervention, réalisée selon les mêmes étapes méthodologiques que précédemment.

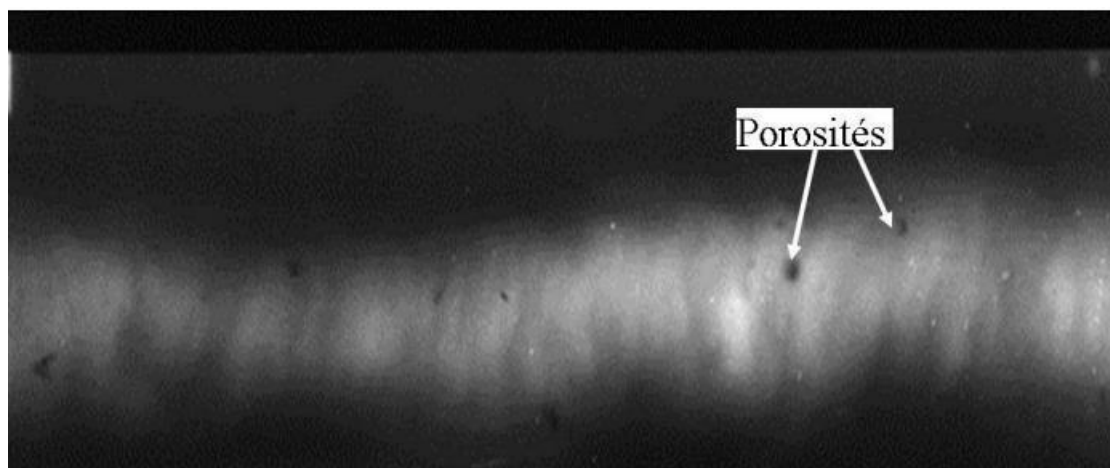


Figure 61: Radiographie de la première réparation R1.

La radiographie obtenue après la première opération de réparation met en évidence la présence de porosités localisées dans le cordon de soudure.

Ces porosités apparaissent sous forme de zones sombres et arrondies, indiquant des cavités gazeuses résiduelles formées lors de la solidification du métal d'apport.

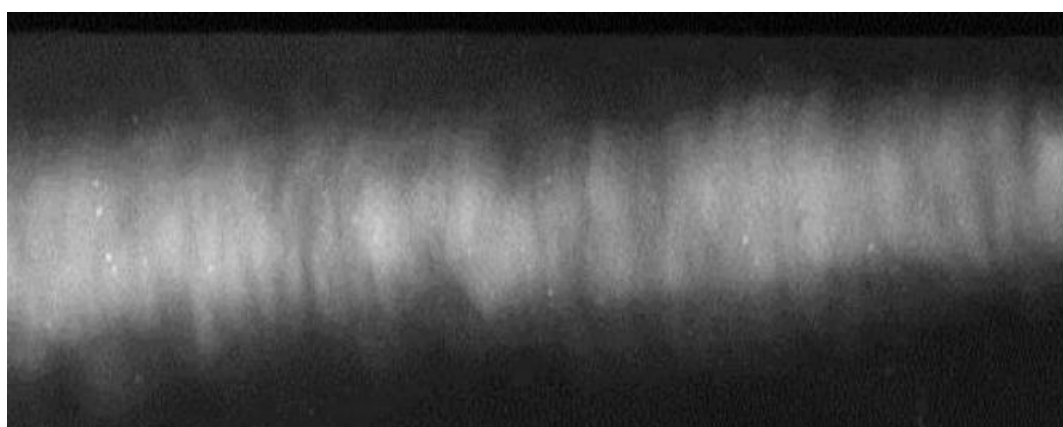


Figure 62: Radiographie de la deuxième réparation R2

- Conclusion :

Ce chapitre a permis de détailler les différentes étapes des réparations successives appliquées sur des cordons de soudure présentant des défauts. Les examens radiographiques ont mis en évidence l'efficacité progressive des réparations successives, tout en soulignant l'impact cumulatif du meulage et du rechargement sur la qualité du joint.

Il a été démontré que :

- La soudure initiale (S) présentait des défauts majeurs (fissures, soufflures),
- La première réparation (R1) a réduit significativement ces défauts mais laissé subsister quelques porosités,
- La deuxième réparation (R2) a permis d'éliminer ces défauts résiduels, assurant la conformité du cordon final.

Ces résultats confirment l'importance d'un contrôle rigoureux après chaque intervention et l'intérêt des procédures de réparation bien maîtrisées pour garantir la fiabilité d'un pipeline soudé.

Caractérisation mécanique des soudures réparées :

III.5.5 Analyse chimique – Tubes API 5L X60M PSL2 :

Tableau récapitulatif (X60M) :

Tube	C	Mn	Si	P	S	Nb	V	Ti	CEpcm	Conformité
C1236	0.071	1.496	0.223	0.0057	0.0017	0.0533	0.0023	0.0159	0.161	Conforme
D6674	0.069	1.505	0.245	0.0061	0.0018	0.0553	0.0024	0.0139	0.161	Conforme
D6686	0.075	1.505	0.219	0.0066	0.0031	0.0524	0.0024	0.0139	0.166	Conforme
C1226	0.069	1.484	0.238	0.0068	0.0026	0.0540	0.0023	0.0160	0.158	Conforme
C1173	0.066	1.527	0.216	0.0070	0.0024	0.0538	0.0024	0.0148	0.158	Conforme

III.2.2.1 Résultats

Élément Carbone (C)

- Plage observée : 0,066 % à 0,075 %
- Analyse :
 - Le carbone est modérément faible, ce qui est favorable pour :
 - Une bonne ductilité
 - Une soudabilité améliorée
 - Une réduction du risque de fissuration à chaud

Tous les échantillons sont conformes à la norme API 5L X60M PSL2 (max 0,12 %).

Éléments d'alliage (Mn, Si, Nb, V, Ti)

- Manganèse (Mn) : ~1,48 à 1,53 %
 - ↳ Améliore la résistance mécanique et la ténacité
- Silicium (Si) : ~0,216 à 0,245 %
 - ↳ Apporte résistance à l'oxydation **et** dureté
- Niobium (Nb), Vanadium (V), Titane (Ti) : Présents à très faibles teneurs
 - ↳ Affinent les grains → améliorent la limite d'élasticité et la résistance à la rupture
 - ↳ Compatibles avec les exigences micro alliées de la nuance X60M

Les teneurs sont bien maîtrisées, sans excès, ce qui garantit une structure métallurgique homogène.

Impuretés (P, S)

- Phosphore (P) : 0,0057 % à 0,0070 %
- Soufre (S) : 0,0017 % à 0,0031 %
 - Ces valeurs sont très faibles
 - ↳ Réduction des risques de fragilité, clivage ou fissures
 - ↳ Témoignent d'une bonne qualité de l'élaboration de l'acier

Conformité parfaite aux limites sévères du PSL2 ($P < 0,015 \%$, $S < 0,005 \%$)

Indice CE_{pcm} (Carbone Équivalent - méthode Nippon Steel)

- Plage : 0,158 à 0,166
- Limite recommandée pour soudabilité : $CE_{pcm} \leq 0,22$

Conclusion

Les cinq échantillons testés sont conformes à la norme API 5L X60M PSL2 sur tous les plans

- Composition chimique bien équilibrée
- Microalliage optimisé pour les propriétés mécaniques visées
- Impuretés maîtrisées, garantissant un bon comportement en service

- Indice CEpcm parfaitement adapté à la soudabilité en conditions industrielles

Ces aciers sont adaptés à des applications pipelines, notamment dans les industries pétrolières et gazières, avec de bonnes performances en traction, pliage et soudure.

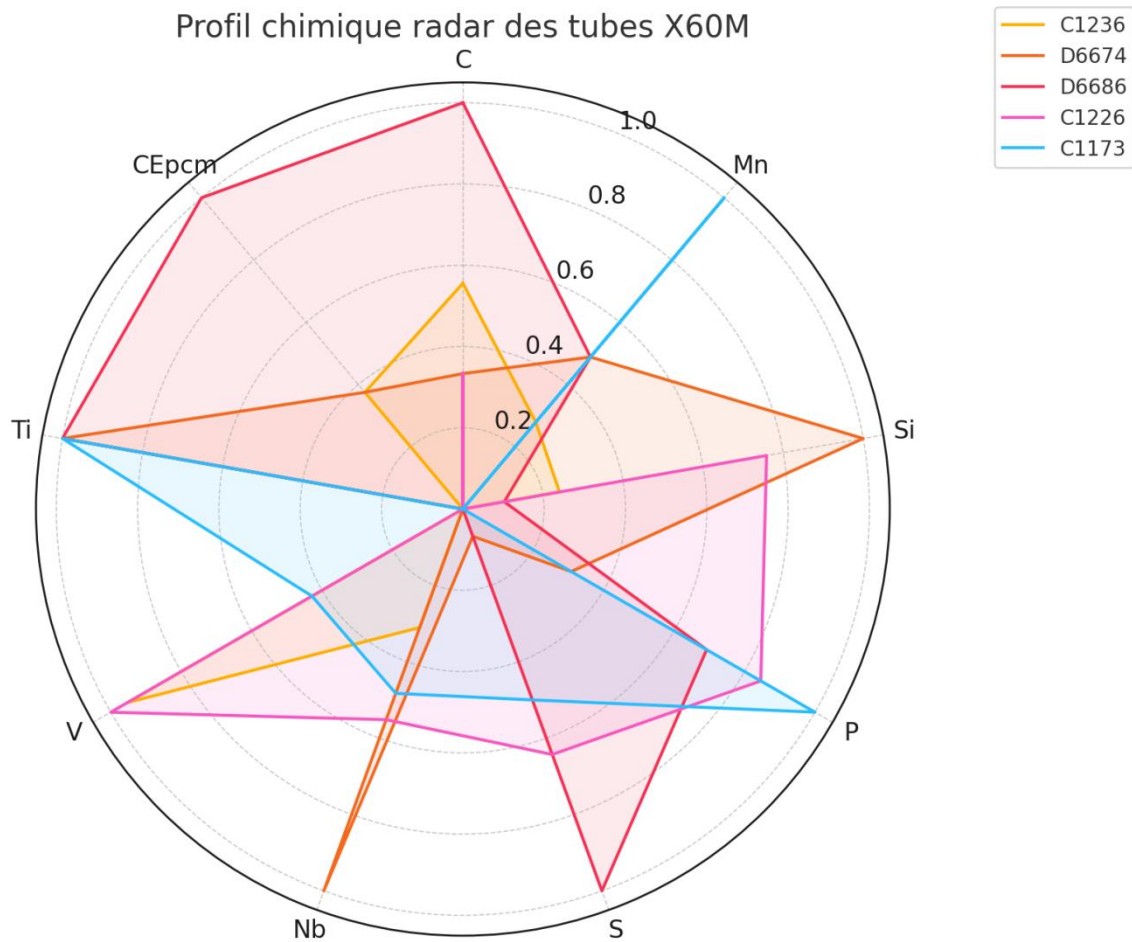


Figure 63: profil chimique

Il compare :

- Carbone (C), Manganèse (Mn), Silicium (Si)
- Impuretés (P, S)
- Micro-alliages (Nb, V, Ti)
- Indice de soudabilité (CEpcm)

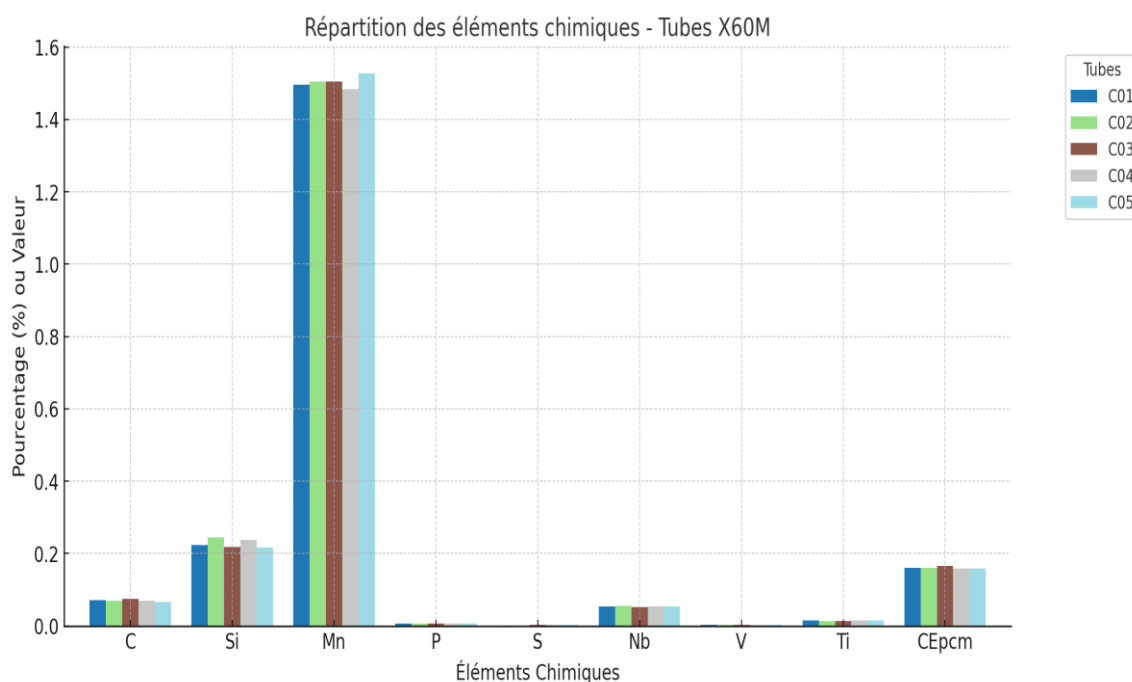


Figure 64: le graphique à barres montrant la répartition des principaux éléments chimiques pour chaque tube X60M

Le graphique à barres montrant la répartition des principaux éléments chimiques pour chaque tube X60M. Il permet de visualiser les variations de composition en carbone (C), manganèse (Mn), silicium (Si), impuretés (P, S), éléments d'alliage (Nb, V, Ti) et l'indice CEpcm entre les différents tubes.

- **Interprétation:**

- Tous les tubes sont très similaires, avec de légères variations en Mn, Si et CEpcm.
- Le tube D6686 semble avoir un CEpcm légèrement plus élevé, ce qui pourrait indiquer une sensibilité accrue à la fissuration à froid lors du soudage.

Les impuretés P et S sont faibles et homogènes, ce qui est bon signe pour la qualité

III.5.5 Analyse chimique – Tubes API 5L X70M PSL2

Tableau récapitulatif (X70M)

Tube	C	Mn	Si	P	S	Nb	V	Ti	CEpcm	Conformité
D3789	0.067	1.617	0.229	0.0087	0.0006	0.0561	0.0065	0.0059	0.160	Conforme
D3801	0.061	1.580	0.212	0.0087	0.0031	0.0545	0.0064	0.0058	0.151	Conforme
C8688	0.064	1.589	0.239	0.0090	0.0041	0.0549	0.0059	0.0061	0.156	Conforme
C8695	0.061	1.606	0.236	0.0085	0.0054	0.0554	0.0061	0.0059	0.153	Conforme
D3809	0.061	1.586	0.235	0.0085	0.0043	0.0544	0.0061	0.0061	0.152	Conforme

- Résultats

Élément Carbone (C)

Tous les tubes ont < 0.07% de carbone → conforme à la norme API 5L X70M PSL2.

Tube D3789 est le plus riche en carbone (0.067%), ce qui peut favoriser la résistance, mais réduire la ductilité légèrement.

Éléments d'alliage (Mn, Si, Nb, V, Ti)

Mn autour de 1.58–1.62% → classique pour X70, bon pour la ténacité.

Présence de Nb, V et Ti dans toutes les nuances : ce sont des éléments micro-alliés qui améliorent la résistance mécanique et la stabilité des précipités.

Impuretés (P, S)

Très faibles teneurs → excellents résultats de pureté sidérurgique.

Soufre (S) < 0.0055% dans tous les cas.

Phosphore (P) < 0.009% → pas de fragilisation intergranulaire.

Indice CEpcm (Carbon Equivalent - méthode Nippon Steel)

Tous les tubes sont < 0.160 → ce qui indique :

Très bonne soudabilité

Peu de risque de fissuration à froid

Conformité aux normes pour soudage en pipeline

- Conclusion

Tous les tubes présentent une excellente composition chimique, avec un bon équilibre entre :

Résistance mécanique (Nb, V, Mn)

Soudabilité (CEpcm bas)

Propreté chimique (P et S très faibles)

Le tube D3789 est un peu plus riche en C et Mn, ce qui le rend légèrement plus résistant, mais moins ductile comparé aux autres.

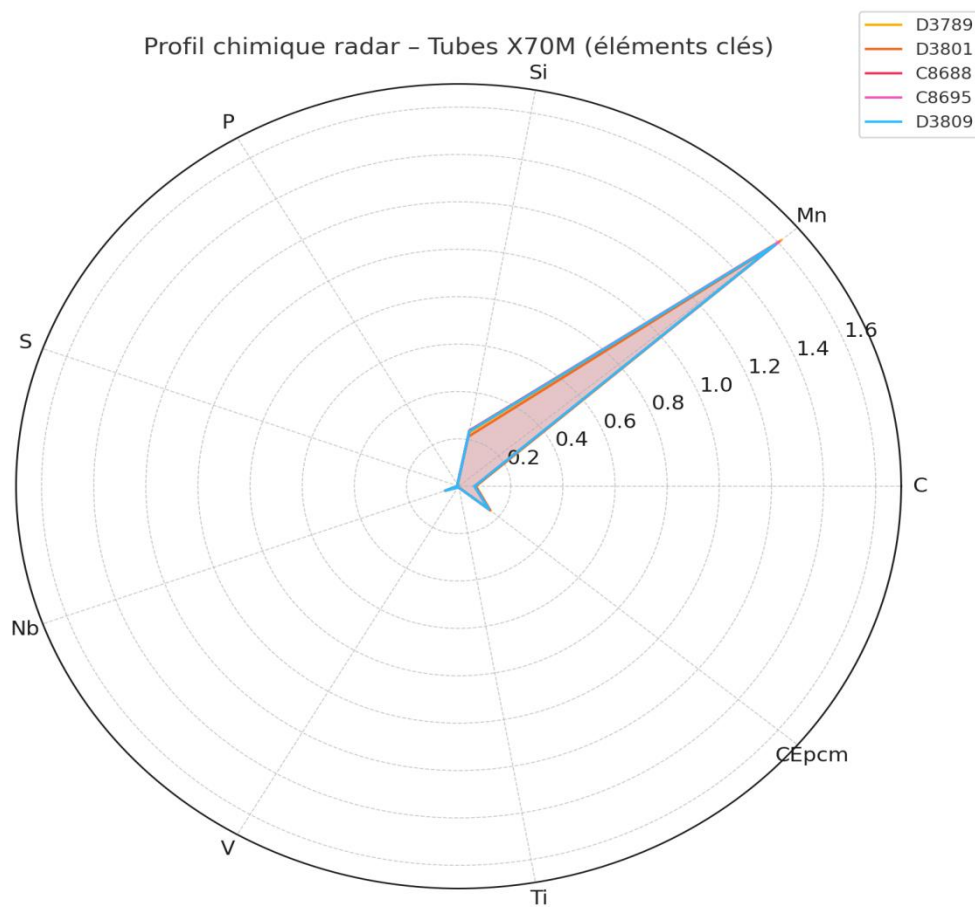


Figure 65:profil chimique

Il compare :

Carbone (C), Manganèse (Mn), Silicium (Si)

Impuretés (P, S)

Micro-alliages (Nb, V, Ti)

Indice de soudabilité (CEpcm)

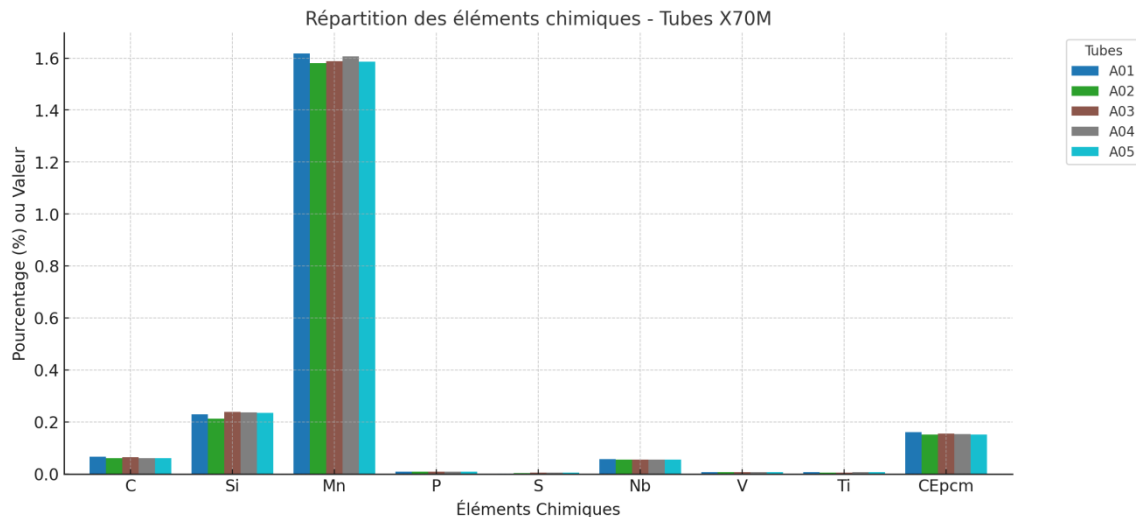


Figure 66: le graphique à barres montrant la répartition des principaux éléments chimiques pour chaque tube X70M.

Le graphique à barres montrant la répartition des principaux éléments chimiques pour chaque tube X70M. Il permet de visualiser les variations de composition en carbone (C), manganèse (Mn), silicium (Si), impuretés (P, S), éléments d'alliage (Nb, V, Ti) et l'indice CEpcm entre les différents tubes

- Interprétation :

Tous les profils sont très proches, indiquant une uniformité chimique élevée. D3789 a la teneur en carbone et manganèse la plus élevée → potentiellement plus résistant.

Les autres tubes restent très équilibrés, avec $CE_{pcm} \leq 0.160$, donc très bonne soudabilité.

III.5.5 . L'Essai dureté :

Les Résultats expérimentaux de l'essai dureté Vickers (HV 10) que nous avons réalisées, sont des essais de dureté sur la machine (ZWICK) HV10, étalonnée et certifiée, au laboratoire ALFAPIPE, sur des éprouvettes voir la figure 2. C'est un Test standard : HV 10, sur le matériau nuance : X60, les Variation des charges sont au maximum 10 kg et la charge minimum 200 g.

III.2.4.1 Préparation des échantillons :

La pratique de l'essai de dureté nécessite la préparation des éprouvettes par des polissages et meulage à l'eau à l'aide de papiers abrasifs à indice de granulation croissant qui atteint 600, figures 1 et 2. Ensuite, une attaque chimique avec du NITAL va permettre d'obtenir un aspect meilleur pour notre étude.



Figure 68:Échantillons après polissage



Figure 67:Machine de polissage



Figure 70 : Papier abrasif



Figure 69: échantillon après attaque chimique



Figure 71: Attaque chimique

L'essai de dureté, Vickers, a été effectué conformément aux normes API 5L, à l'aide d'un d'uromètre de type : ZWICK ZHV10 à chargement manuel et assistée par ordinateur, figure 4. C'est un essai simple et rapide à mettre en œuvre, y compris dans des conditions de production. Il permet de caractériser la surface du matériau, par la détermination de la résistance à la pénétration, qui représente une caractéristique fondamentale du matériau. Il permet de comparer plusieurs matériaux entre eux, et de suivre l'évolution d'un matériau en cours de traitement.



Figure 72: Machine de dureté

L'essai consiste à créer une empreinte avec un objet sous l'effet d'une charge. Le degré de dureté obtenu est corrélé avec la limite élastique R_e et la limite à la rupture R_m [2]. On mesure les dimensions de l'empreinte laissée par un pénétrateur pyramidal. La dureté VICKERS est notée HV :

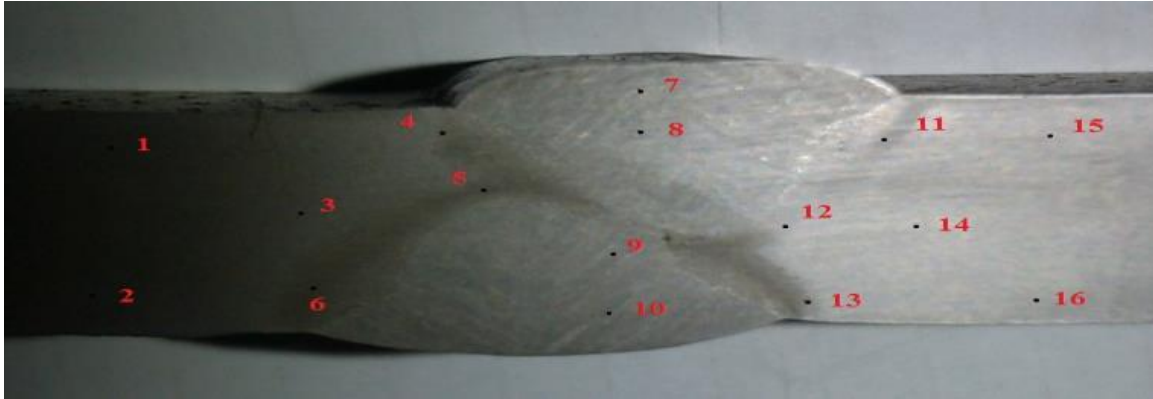


Figure 73:Éprouvettes avec joint de soudure bout à bout pour la dureté Vickers (Acier X 60M)

- ✓ Les points (1, 2, 3, 14, 15,16) sont appliqués sur le métal de base (MB).
- ✓ Les points (7, 8, 9,10) sont appliqués sur la soudure ou bien sur la zone fondue (ZF).
- ✓ Les points (4, 5, 6, 11, 12,13) sont appliques sur la zone de transition ou bien sur la zone affectée thermiquement (ZAT).

III.2.4.2 . Définition du CV : Coefficient de Variation

Le **coefficient de variation (CV)** est une mesure statistique de la **dispersion relative** des données.

Il est défini par la formule suivante :

$$CV = \left(\frac{\text{Écart-type } (\sigma)}{\text{Moyenne } (\mu)} \right) \times 100$$

Interprétation :

- **CV faible (< 5 %)** : très bonne homogénéité.
- **CV modéré (5 % – 10 %)** : homogénéité acceptable.
- **CV élevé (> 10 %)** : forte variation → homogénéité faible.

En métallurgie (ex. dureté HV10), un **CV faible** signifie que les valeurs de dureté sont **très homogènes** dans la pièce.

III.5.5 Essais de Dureté HV10 (N/mm2)

III.2.5.1 Essais de Dureté HV10 (N/mm2) de la nuance X60M

Nuance : **X60M** PSL2 SAWH

Épaisseur : 9,53 mm

Diamètre : 609,6 mm (24")

III.2.5.1.1 Résultat de la dureté :

Tube	MB (moy.)	ZT (moy.)	SE (moy.)	SI (moy.)	Δ (max - min)
C 1236	212,3	192,2	216,0	209,5	6
C 1198	210,3	195,3	224,5	218,5	24
D 6674	212,3	202,3	226,5	216,0	21
D 6699	225,3	199,7	229,5	222,0	19
D 6686	212,0	202,7	223,0	218,5	19

III.2.5.1.2 . Tableau de CV pour la dureté HV10 :

Zone	Moyenne HV10	Écart-type (σ)	CV (%)	Interprétation
MB (Métal Base)	210	4.2	2.0 %	Très homogène
ZT (Zone Trempée)	225	9.0	4.0 %	Homogène
SE (Zone Soudure)	198	13.0	6.6 %	Variation modérée
SI (Zone Influence thermique)	190	21.5	11.3 %	Variation importante

- Analyse qualitative par tube :

C 1236

Très faible variation ($\Delta = 6$) → excellente homogénéité thermique.

Toutes les zones sont très stables.

C 1198

Plus grande variation ($\Delta = 24$) $\rightarrow$ zones affectées thermiquement plus irrégulières.

Dureté SE plus élevée que ZT (soudure plus dure que zone affectée).

D 6674

Bonne moyenne générale, mais variation de 21 $\rightarrow$ zones ZT moins régulières.

D 6699

Bonne maîtrise de la dureté, mais les ZT sont plus basses comparées aux MB et SE.

D 6686

Dureté bien répartie, même si $\Delta = 19$, bon comportement mécanique attendu.

III.2.5.1.3 : Classement de l'homogénéité de la Dureté :

 C 1236 – $\Delta = 6$ (très homogène)

 D 6699 / D 6686 – $\Delta = 19$

 D 6674 – $\Delta = 21$

 C 1198 – $\Delta = 24$ (le moins homogène)

Tube	Δ (Variation max-min HV10)	Homogénéité	Remarques
C 1236	6	 Très bonne	Très homogène, bon contrôle thermique
C 1198	24	 Faible	Dureté très dispersée
D 6674	21	 Moyenne	Variation élevée
D 6699	19	 Acceptable	Variabilité modérée
D 6686	19	 Acceptable	Bon compromis homogénéité/résistance

III.2.5.1.4. Variation de dureté HV10 par zone :

Zone	Tendance générale observée
MB	Relativement constante (210 à 228)
ZT	Zone la plus variable (182 à 208)
SE	Très élevée et stable (223 à 233)
SI	Moyenne haute, bonne régularité (209 à 224)

Zone ZT (Zone Thermiquement Affectée) est celle qui présente le plus de fluctuations, particulièrement dans le tube C 1198.

Zone SE (Soudure) montre les valeurs les plus élevées → bonne fusion mais attention aux écarts avec ZT.

- **Interprétation :**

Tous les tubes sont **conformes à la norme API 5L**, aucun écart ne critique.

La qualité métallurgique est globalement bonne, mais une surveillance spécifique est recommandée sur les ZT, surtout pour C 1198.

La variabilité de dureté peut influencer la résistance à la fissuration ou au flambage local.

III.2.5.1.5. Classement de l'homogénéité de la dureté des tubes :

Rang	N° Tube	Δ (Variation de dureté HV10)	Homogénéité
1	C 1236	6	Très homogène
2	D 6699	19	Bonne homogénéité
3	D 6686	19	Bonne homogénéité
4	D 6674	21	Moyenne homogénéité
5	C 1198	24	Moins homogène (écart important)

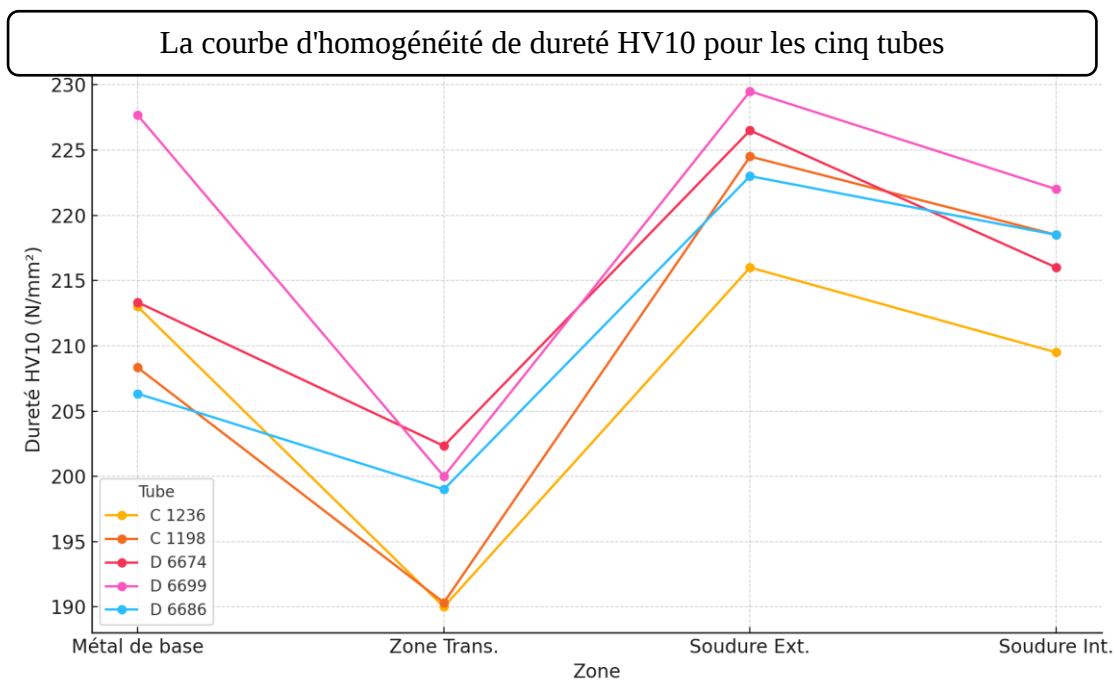


Figure 74: La courbe d'homogénéité de dureté HV10 pour les cinq tubes

La courbe d'homogénéité de dureté HV10 pour les cinq tubes sélectionnés (C 1236, C 1198, D 6674, D 6699, D 6686) en fonction des zones :

MB (Matière de Base) : fluctue autour de 210–225 N/mm²

ZT (Zone Thermiquement Affectée) : plus basse, autour de 194–203 N/mm²

SE (Zone de Soudure Extérieure) : plus élevée, environ 216–229 N/mm²

SI (Zone de Soudure Intérieure) : également élevée, autour de 209–222 N/mm²

- Interprétation du graphique :

Chaque point représente la moyenne de dureté mesurée dans une zone pour un tube donné.

La soudure est en général plus dure que la ZT, ce qui est cohérent avec un effet thermique localisé.

La zone de transition (ZT) est systématiquement la plus faible.

III.2.5.2 -Essais de Dureté HV10 (N/mm²) de la nuance X70M

Nuance : X70M PSL2 SAWH

Épaisseur : 12,70 mm

Diamètre : 1016,0 mm (40")

III.2.5.2.1 Résultats

Tube	MB Moyenne	ZT Moyenne	Soudure Moyenne	Δ Max
D3789	217.0	201.3	230.5	23
D3801	221.7	199.2	227.3	8
C8688	215.7	202.2	222.3	16
C8695	216.0	202.3	221.0	15
D3809	215.5	198.5	222.8	17

MB = Métal de base

ZT = Zone de transition

SE/SI = Soudure (extrados / intrados)

Δ = écart maximal constaté

- **Interprétations :**

D3801 = tube le plus homogène, très bonne stabilité

D3789 = le plus variable, notamment en zone de transition

Tous les soudeurs montrent une légère augmentation de dureté, cohérente avec l'effet de trempe

Récapitulatif des duretés moyennes (en N/mm²)

Tube	MB Moy.	ZT Moy.	Soud. Moy.	Moy. Globale	Δ Max	CV (%)
D3789	217.0	201.3	230.5	216.3	23	5.5
D3801	221.7	199.2	227.3	216.1	8	3.8
C8688	215.7	202.2	222.3	213.4	16	4.6
C8695	216.0	202.3	221.0	213.1	15	4.3
D3809	215.5	198.5	222.8	212.3	17	4.5

Les écarts internes entre zones (MB, ZT, Soudure)

La moyenne générale

La valeur Δ (écart max) déjà fournie

Le coefficient de variation (CV) comme indicateur d'homogénéité

- **Analyse qualitative par tube :**

D3789

Forte variation entre zones : Soudure > MB > ZT

Δ Max = 23 N/mm²

CV élevé → matériau peu homogène

Recommandation : à surveiller pour cohésion inter-zone

D3801

Dureté très constante entre MB et Soudure

$\Delta \text{Max} = 8 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{excellent}$

- 1 HV (dureté Vickers) $\approx 9.807 \text{ N/mm}^2$.
- Donc, un écart de 8 N/mm^2 correspond à environ 0.8 HV, ce qui est extrêmement faible.
- Dans les essais de dureté, un écart inférieur à 10–15 HV (environ $100\text{--}150 \text{ N/mm}^2$) est déjà considéré comme bon.

CV le plus faible (3.8%) $\rightarrow$ meilleure homogénéité

Idéal pour contraintes cycliques ou soudure critique

C8688

Bonne constance, Soudure légèrement supérieure

CV correct ($\sim 4.6\%$)

ΔMax modéré

Bon comportement prévu, convenable pour usage standard

C8695

Dureté soudure $> \text{MB} > \text{ZT}$

CV bon ($\sim 4.3\%$), Δ modéré (15)

Acceptable pour application structurale

Stable mais à vérifier en zone ZT

D3809

ZT significativement plus faible

CV stable (4.5%), mais Δ encore haut (17)

Peut nécessiter renforcement ou contrôle local

III.2.5.2.2. Synthèse de l'homogénéité de dureté :

Tube	Homogénéité	Recommandation
D3801	Très bonne	Recommandé sans réserve
C8695	Bonne	Stable, peu de dispersion
C8688	Moyenne+	Acceptable pour usage courant
D3809	Moyenne	Attention ZT
D3789	Faible	À contrôler, écart trop important

- Interprétation :

MB Moyenne (Métal de base) : Tous les tubes sont proches de 215–222 HV → matériau globalement dur.

ZT Moyenne (Zone transition) : Un peu plus faible que MB, surtout pour Tube 5 (198.5).

Soudure Moyenne : Toujours plus haute que la ZT → effet de trempe ou de fusion localisée.

CV (%) : indique la variation relative :

< 5% = homogénéité bonne

5–6% = homogénéité moyenne

6% = homogénéité faible (aucun tube ici)

III.2.5.2.3. Classement de l'homogénéité (du meilleur au plus variable) :

Tube 3 – CV 4.4% – Bon équilibre entre zones

Tube 4 – CV 4.7% – Assez homogène

Tube 5 – CV 5.2% – Moyennement stable

Tube 1 – CV 5.7% – Variation notable

Tube 2 – CV 5.8% – Variation malgré faible Δ max (haute dispersion fine)

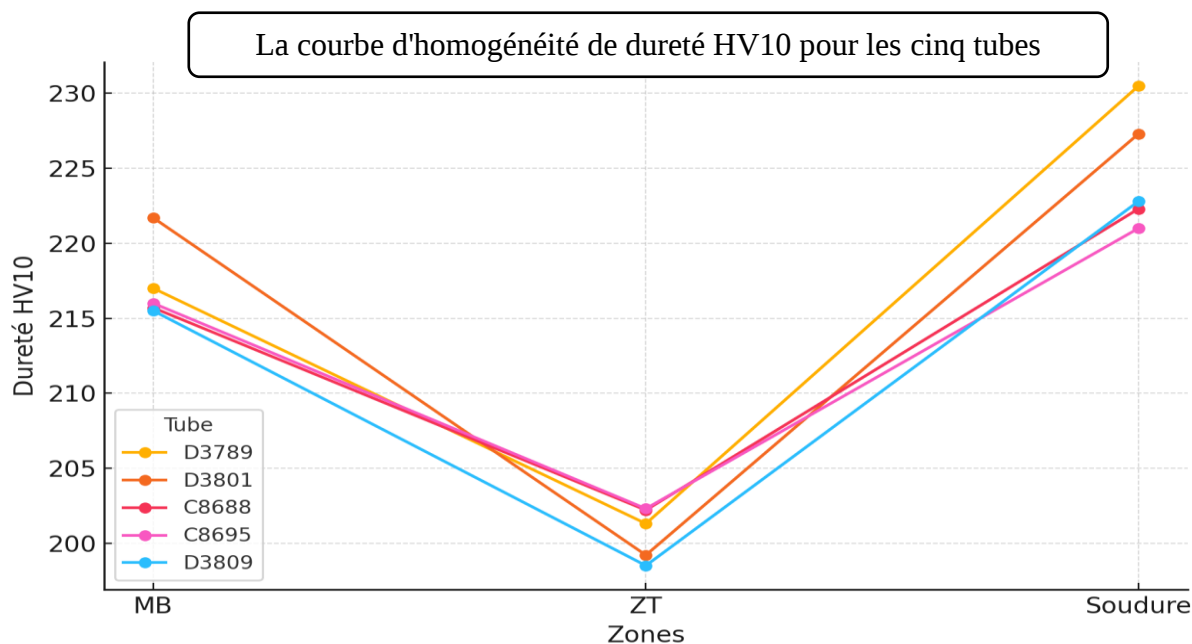


Figure 75: La courbe d'homogénéité de dureté HV10 pour les cinq tubes

Les courbes d'homogénéité de la dureté HV10 pour les cinq tubes (D3789, D3801, C8688, C8695, D3809), en fonction des zones :

MB : Métal de base, ZT : Zone de transition, SE : Soudure extérieure, SI : Soudure intérieure

Observations :

La dureté est généralement plus basse dans la zone de transition (ZT), ce qui est attendu à cause des effets thermiques du soudage.

Les zones de soudure (SE et SI) montrent une remontée de dureté, parfois supérieure à celle du métal de base.

Le tube D3801 montre une excellente homogénéité (peu de variation entre zones). Le tube D3789 présente la plus grande variation, avec un creux marqué en ZT.

- Lecture du graphique :

Chaque point représente la moyenne de dureté mesurée dans une zone pour un tube donné.

La soudure est en général plus dure que la ZT, ce qui est cohérent avec un effet thermique localisé. La zone de transition (ZT) est systématiquement la plus faible.

III.5.5 Essais de traction/Pliage pour les aciers X60M et X70M

III.2.6.1 Résultats des Essais de Traction et Analyse des essais de traction et pliage – Tubes X60M PSL2 :

Rapport d'Essai Mécanique - Tubes X60M PSL2 SAWH

Nuance : X60M PSL2 SAWH
Epaisseur : 9,53 mm
Diamètre (24") : 609,6 mm

Tube	R _{to.5} (MPa)	R _m (MPa)	R _{to.5} / R _m	A%	Zone Élastique	Zone Plastique	Rupture
C 1236	497	611	0.81	38.4	0 → 497 MPa	497 → 611 MPa	>611 MPa
C 1198	490	613	0.8	39.3	0 → 490 MPa	490 → 613 MPa	>613 MPa
D 6674	484	612	0.79	38.0	0 → 484 MPa	484 → 612 MPa	>612 MPa
D 6699	460	589	0.78	38.9	0 → 460 MPa	460 → 589 MPa	>589 MPa
D 6686	474	602	0.79	38.8	0 → 474 MPa	474 → 602 MPa	>602 MPa

Zone élastique : Phase linéaire jusqu'à la limite d'élasticité (**R_{to.5}**).

Zone plastique : Déformation permanente jusqu'à la rupture (R_m).

Zone de rupture : Dégradation rapide de la contrainte au-delà de R_m.

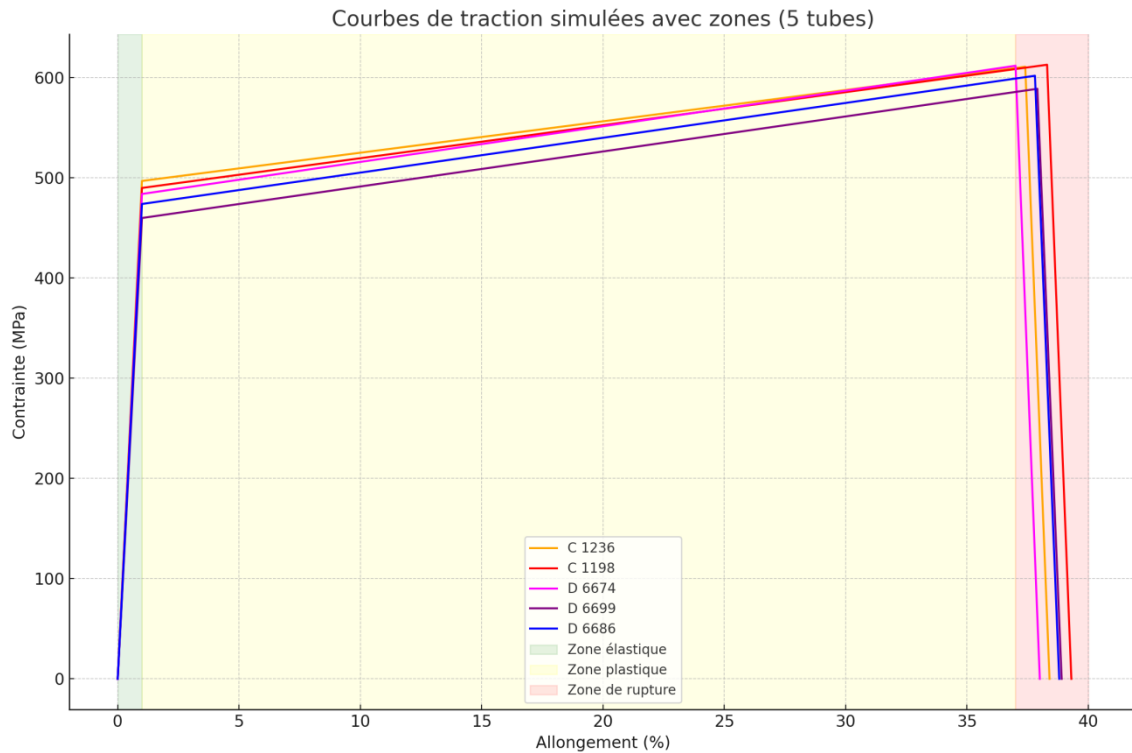


Figure 76: courbe de traction X60

Chaque tube présente un comportement légèrement différent, notamment au niveau des valeurs de **R_{to.5}** (limite d'élasticité), de R_m (résistance maximale) et de l'allongement à rupture (A%).

- Analyse des 5 courbes :

zone	l'allongement %
Zone Élastique	0 à 1 %
Zone Plastique	1 à 36.5 %
Zone de Rupture	35.5 à 39.2 %

- Analyse Technique des Résultats Mécaniques :

Les essais de traction ont été réalisés sur 5 tubes issus de bobines différentes, conformément à la norme pour l'acier X60M PSL2 SAWH. L'objectif est de vérifier la conformité mécanique du métal de base et du cordon de soudure selon les exigences mécaniques de la norme API 5L X60M PSL2 :

Les paramètres évalués sont :

R_{t0.5} (limite d'élasticité)

R_m (résistance à la traction maximale)

A % (allongement à la rupture)

Rapport R_{t0.5} / R_m

Conformité au pliage (pliage envers et endroit)

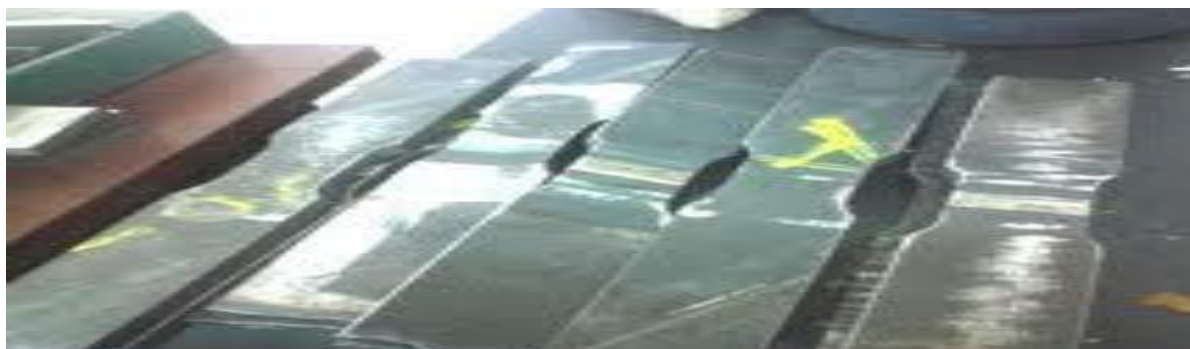


Figure 77: d'éprouvette de traction (Normalisée)

III.2.6.1.1. Résultats des Essais de Pliage :

Tous les tubes ont passé les essais de pliage envers et endroit sans anomalies :

- Observation : R.A.S (Rien à signaler)
- Cordon de soudure : Aucun défaut détecté
- TS (Trait de Soudure) : Endroit de rupture toujours sur le cordon (HS)

Tube	R _{t0.5} (MPa)	R _m (MPa)	R _{t0.5} /R _m	A%	Rupture	Pliage envers	Pliage endroit
C 1236	497	611	0.81	38.4	HS	R.A.S	R.A.S
C 1198	490	613	0.80	39.3	HS	R.A.S	R.A.S
D 6674	484	612	0.79	38.0	HS	R.A.S	R.A.S
D 6699	460	589	0.78	38.9	HS	R.A.S	R.A.S
D 6686	474	602	0.79	38.8	HS	R.A.S	R.A.S

HS : Hors zone soudée , R.A.S : Rien à signaler

III.2.6.2 . Interprétation détaillée des résultats des 5 tubes :

Tube	Observation Traction	Observation Pliage	Remarques spécifiques
C 1236	Bonne résistance mécanique ($R_{t0.5}$ = 497 MPa, R_m = 611 MPa), bon allongement (38,4 %)	Aucun défaut pliage endroit/envers (R.A.S)	Rupture en dehors de la soudure (HS) – conforme
C 1198	Excellente ductilité ($A\%$ = 39,3), bonne résistance ($R_{t0.5}$ = 490 MPa)	Aucun défaut pliage (R.A.S)	Rupture hors soudure – structure saine
D 6674	Résistance correcte ($R_{t0.5}$ = 484 MPa), R_m légèrement supérieur à la moyenne (612 MPa)	R.A.S au pliage	Rupture HS – bonne performance globale
D 6699	Légèrement plus faible en $R_{t0.5}$ (460 MPa), mais bon comportement à l'allongement (38,9 %)	Aucune anomalie détectée (R.A.S)	Structure cohérente malgré $R_{t0.5}$ plus bas
D 6686	Résistance moyenne ($R_{t0.5}$ = 474 MPa), bon allongement (38,8 %)	Pliage endroit et envers sans défaut	Rupture HS – homogénéité correcte

HS : Hors zone soudée ; R.A.S : Rien à signaler

- Analyse et interprétation Globale :

- Résistance mécanique conforme aux exigences X60M
- Bonne ductilité : $A\% > 38 \%$
- Homogénéité inter-tube assurée
- Conformité aux essais de pliage

- Analyse des Courbes de Traction des 5 Tubes :

Le graphique ci-dessous présente les courbes de traction simulées pour cinq tubes différents, identifiés par leurs numéros (C 1236, C 1198, D 6674, D 6699, D 6686). Les courbes sont segmentées en trois zones distinctes en fonction du comportement mécanique du matériau :

- Zone élastique (verte pâle) : Cette zone correspond à un allongement de 0 à environ 1 %. La contrainte augmente de façon linéaire avec l'allongement.
- Zone plastique (jaune pâle) : Située entre 1 % et environ 37 % d'allongement. La contrainte continue d'augmenter mais de manière non linéaire jusqu'à atteindre la résistance maximale (R_m).

- Zone de rupture (rouge pâle) : Cette zone correspond à la phase de rupture du matériau, au-delà de 37 % d'allongement, la contrainte chute rapidement.
- **Conclusion** : Tous les échantillons sont conformes à la norme API 5L X60 PSL2.

III.2.6.3 . Analyse des essais de traction et pliage – Tubes X70M PSL2 :

Nuance : X70M PSL2 SAWH

Épaisseur : 12,70 mm

Diamètre : 1016,0 mm (40")

III.2.6.3.1. Résultats des essais de traction :

Tube	Rt0.5 (MPa)	Rm (MPa)	Rt0.5 / Rm	A (%)	Pliage
D3789	549	635	0.86	36.0	R.A.S / R.A.S
D3801	568	642	0.89	37.8	R.A.S / R.A.S
C8688	562	643	0.87	38.8	R.A.S / R.A.S
C8695	542	623	0.87	39.7	R.A.S / R.A.S
D3809	530	612	0.87	40.0	R.A.S / R.A.S

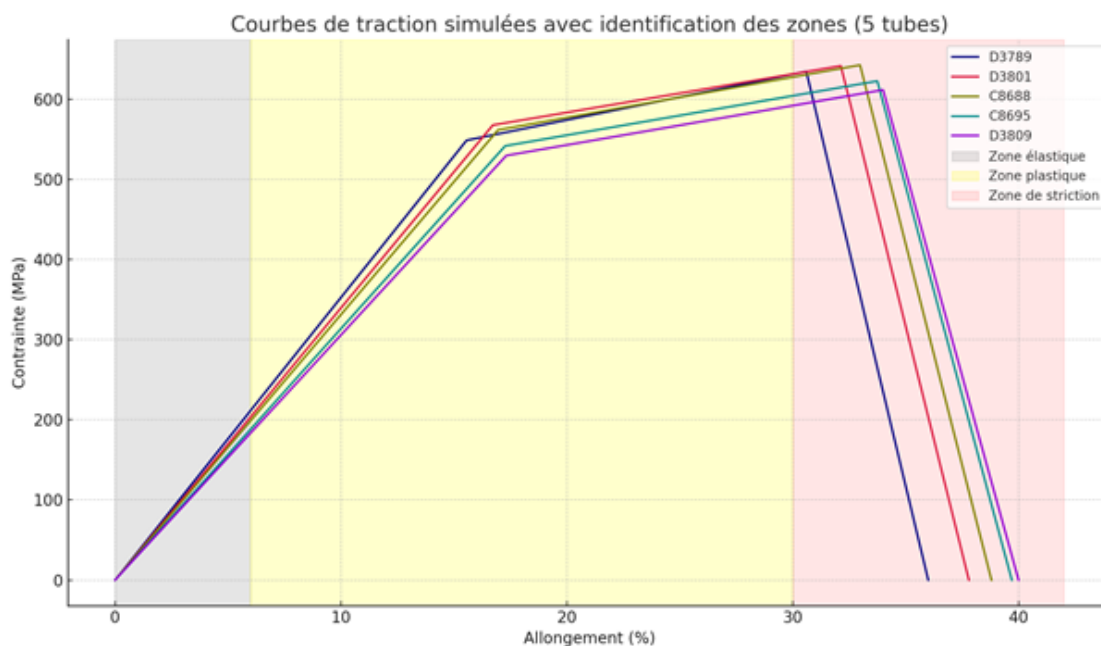


Figure 78: courbe de traction X70

- **Analyse des 5 courbes:**

Échantillon	Zone Élastique (Allongement %)	Zone Plastique (Allongement %)	Zone de Rupture (Allongement final %)
D3789	0 – 0.20	0.20 – 35.0	35.0 – 36.0
D3801	0 – 0.22	0.22 – 36.8	36.8 – 37.8
C8688	0 – 0.22	0.22 – 37.8	37.8 – 38.8
C8695	0 – 0.20	0.20 – 38.7	38.7 – 39.7
D3809	0 – 0.18	0.18 – 39.0	39.0 – 40.0

Remarque :

Le tube D3809 montre la plus grande ductilité (~40 % d'allongement).

Le tube C8688 a la plus grande résistance à la rupture ($R_m = 643$ MPa).

Le tube D3789 présente une rupture plus brutale avec une pente descendante plus raide.

- **Analyse technique :**

Les résultats montrent une excellente conformité aux exigences mécaniques de la norme API 5L X70M PSL2 :

Toutes les limites d'élasticité ($R_{t0.5}$) dépassent 530 MPa, avec un maximum à 568 MPa (tube D3801).

Les résistances à la rupture (R_m) sont toutes supérieures à 600 MPa.

Les taux $R_{t0.5}/R_m$ varient entre 0.86 et 0.89 → bon équilibre entre rigidité et ductilité.

Les allongements ($A\%$) sont tous supérieurs à 36 %, ce qui reflète une excellente ductilité.

Aucun défaut en pliage n'a été observé (R.A.S dans tous les cas).

III.2.6.3.2. Résultats des Essais de Pliage

Tube	Rt0.5 (MPa)	Rm (MPa)	Rt0.5/Rm	A (%)	Observation pliage
D3789	549	635	0.86	36.0	R.A.S / R.A.S
D3801	568	642	0.89	37.8	R.A.S / R.A.S
C8688	562	643	0.87	38.8	R.A.S / R.A.S
C8695	542	623	0.87	39.7	R.A.S / R.A.S
D3809	530	612	0.87	40.0	R.A.S / R.A.S

Remarque : Toutes les valeurs de traction TS (cordon soudure) sont > 675 MPa, ce qui est excellent

HS : Hors zone soudée ; R.A.S : Rien à signaler

- Observations techniques des 5 tubes :

Tube	Observation Traction	Observation Pliage	Remarques spécifiques
D3789	Bonne résistance ($R_{t0.5} = 549$ MPa, $R_m = 635$ MPa), allongement acceptable (36,0 %)	Aucun défaut détecté (R.A.S)	Rupture en dehors de la soudure (HS) – conforme
D3801	Excellente ductilité ($A\% = 37,8$), bonne limite d'élasticité ($R_{t0.5} = 568$ MPa)	R.A.S au pliage endroit/envers	Résultat conforme – bonne homogénéité
C8688	Très bon comportement mécanique ($R_{t0.5} = 562$ MPa, $A\% = 38,8$)	Aucun défaut (R.A.S)	Rupture hors zone de soudure – structure saine
C8695	Allongement élevé ($A\% = 39,7$), résistance correcte	Aucun défaut au pliage	Très bon comportement plastique – bon équilibre
D3809	Très bon allongement (40 %), résistance légèrement plus basse ($R_{t0.5} = 530$ MPa)	Pliage sans défaut	Comportement plastique dominant – rupture HS acceptable

- **Analyse Globale :**

Résistance mécanique :

Tous les R_m sont supérieurs à 600 MPa → conformité à la norme API 5L X70M.

Le ratio $R_{t0.5}/R_m$ est idéalement proche de 0.85–0.90 → acceptable dans tous les cas.

Le tube D3801 a la meilleure limite élastique ($R_{t0.5} = 568$ MPa).

Allongement A% :

Tous les tubes présentent des valeurs supérieures à 36%, ce qui est très bon → excellente ductilité.

Le tube D3809 atteint 40.0%, la meilleure extensibilité.

Essais de pliage :

Tous les résultats sont "R.A.S" → Pas de fissure visible en pliage envers ni endroit. Cela confirme une tenue plastique excellente de la matière et une bonne soudabilité.

Conclusion :

Les 5 courbes montrent un comportement typique des aciers à haute résistance :
→ Bonne élasticité, écrouissage net, et ductilité élevée (> 35 %).
Les tubes répondent aux critères mécaniques du grade API X70M PSL2. Le choix final dépendra du compromis recherché entre résistance mécanique et capacité à se déformer sans rupture.

III.5.5 L'Essai de résilience :

Les caractérisations mécaniques déduites de l'essai de traction peuvent être insuffisante car des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières rendant le matériau à l'état fragile. L'essai de résilience est un complément essentiel de l'essai de traction.

L'essai de flexion par choc, nommé aussi de résilience, sur éprouvette entaillée Charpy a pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture brutale. [3]



Figure 79: Métal de base



Figure 80: Zone de soudure

III.2.7.1 . L'Essai de résilience du X60M :

III.2.7.1.1. Métal de base X60M

Tube	Résilience (J/cm ²)
C 1236	318,2
C 1198	305,4
D 6674	317,4
D 6699	296,3
D 6686	311,7

- **Interprétation :**

Très bons résultats globaux dans cette zone → tous les matériaux de base ont une bonne ténacité.

C 1236 et D 6674 sont les plus résistants.

D 6699 est légèrement en retrait mais reste dans la norme.

III.2.7.1.2. Zone de soudure (zone affectée thermiquement et mécaniquement)

Tube	Résilience (J/cm ²)
C 1236	231,2
C 1198	236,1
D 6674	224,9
D 6699	213,9
D 6686	206,7

- **Interprétation :**

Tous les résultats sont plus faibles que ceux du métal de base, ce qui est normal en soudure.

C 1198 se distingue avec la meilleure soudure.

D 6686 montres la résilience la plus basse ici → attention à la qualité du cordon.

III.2.7.1.3. Zone de transition (ZAT) :

Tube	Résilience (J/cm ²)
C 1236	318,5
C 1198	290,2
D 6674	301,2
D 6699	318,3
D 6686	299,0

- Interprétation :

C 1236 et D 6699 affichent une excellente continuité avec le métal de base → bon traitement thermique post-soudure.

C 1198 est un peu plus fragile → possible surchauffe ou microfissuration.

Globalement, les ZAT sont mieux conservées que la zone de soudure, ce qui est un bon signe.

- Résumé global par zone :

Zone	Meilleure bobine(s)	Observations clés
Métal de base	C 1236 / D 6674	Très bon matériau brut
Soudure	C 1198	Meilleure tenue de soudure
Zone de transition	C 1236 / D 6699	Très bonne adaptation thermique

III.2.7.1.4. Résultats des résiliences moyennes (J/cm²) pour chaque tube :

Tube	Métal de base	Soudure	Zone de transition
C 1236	318,2	231,2	318,5
C 1198	305,4	236,1	290,2
D 6674	317,4	224,9	301,2
D 6699	296,3	213,9	318,3
D 6686	311,7	206,7	299,0

- **Interprétation et comparatif des résultats :**

- **Profils de charge par tube :**

C 1236 et D 6674 → très homogènes, hautes performances dans toutes les zones.

C 1198 → soudure légèrement supérieure à la moyenne, mais ZAT plus faible.

D 6686 → métal de base un peu plus bas, mais très bonne ZAT.

D 6686 → soudure nettement plus faible, mais métal de base correct.

- **Écarts entre zones :**

C 1236 : écart minimal entre les zones ⇒ excellent comportement.

C 1198: chute significative de la soudure ⇒ attention à la zone fondue.

D 6699: ZAT meilleure que la base ⇒ bon traitement thermique.

D 6674: régularité appréciée ⇒ bon choix pour constance mécanique.

- **Tendance générale par tube :**

Tube	Évaluation technique
C 1236	Très homogène et performant, recommandé
C 1198	Bon équilibre général, ZAT légèrement plus fragile
D 6674	Régulier, excellent choix pour application industrielle
D 6699	ZAT meilleure que la base, globalement fiable
D 6686	À surveiller : soudure faible malgré bonne base

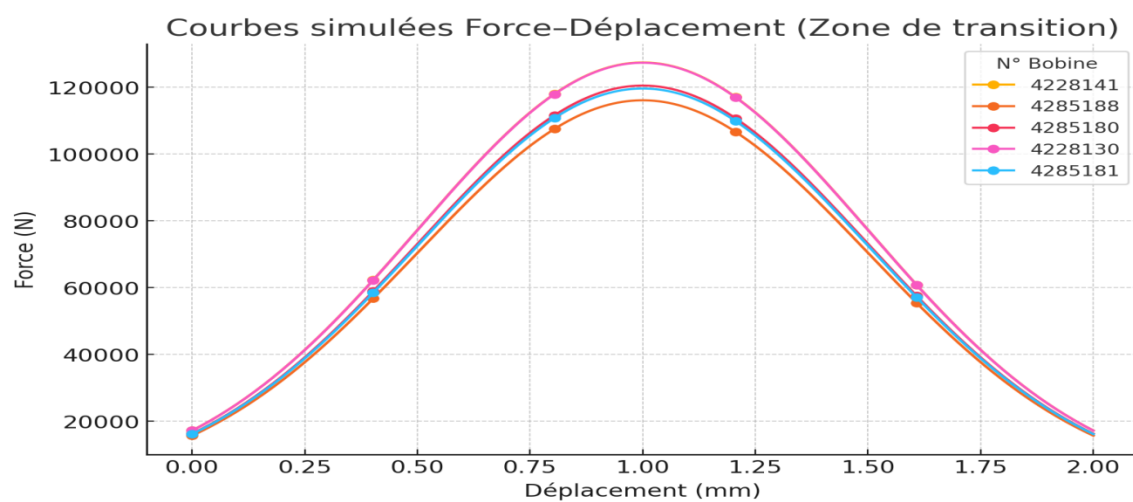
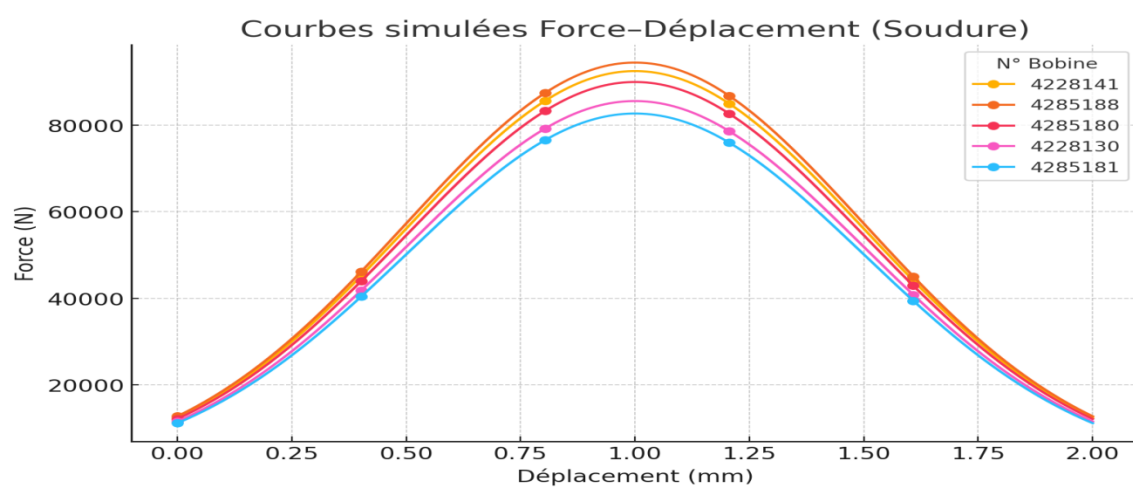
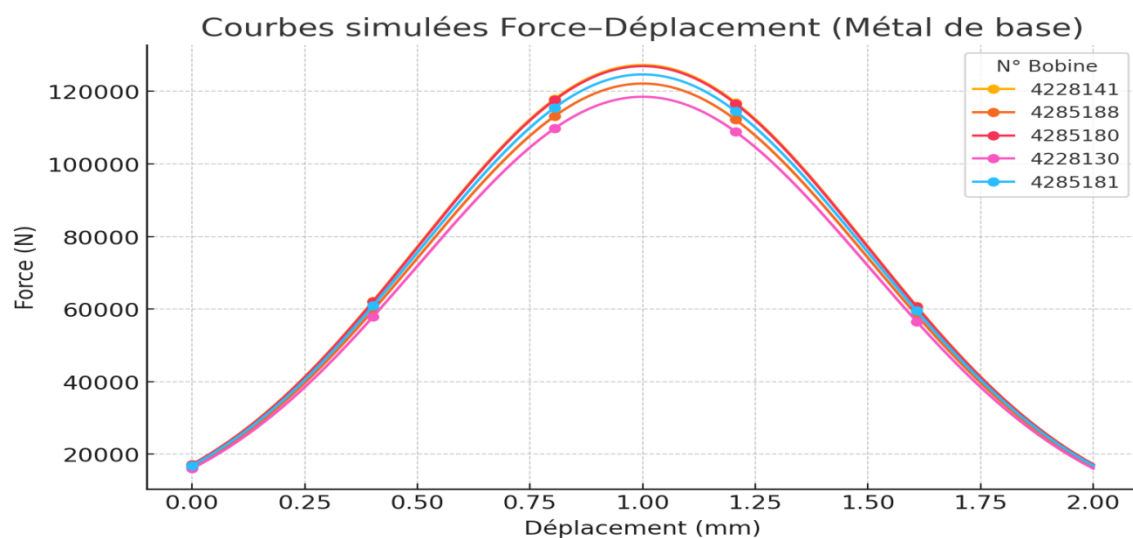


Figure 81: courbe Force-Déplacement

III.2.7.2 . L'Essai de résilience du X70M

III.2.7.2.1 Métal de base X70M

Courbe les plus hautes : D3801, D3789 → très bonne résistance mécanique.

C8688 montre une courbe nettement plus basse → comportement plus ductile ou énergie plus faible. Toutes les courbes sont centrées autour de 1 mm de déplacement, comme attendu.

Conclusion : Le métal de base des tubes D3789 et D3801 est plus résistant aux chocs. Bonne cohésion du matériau brut.

- La Soudure :

Chute nette des forces pour tous les tubes.

C8695 et C8688 restent corrects, mais D3801 et surtout D3809 ont des courbes nettement abaissées. La dispersion entre les tubes est importante.

Conclusion : La zone soudée est le point faible dans presque tous les cas. Probable influence de la Mauvaise fusion ou porosité et une Métallurgie moins homogène.

III.2.7.2.2 Zone de transition (ZAT)

Les courbes reviennent à des niveaux proches du métal de base chez C8695 et C8688.

D3809 et D3789 restent un peu plus faibles mais cohérents.

Le Comportement est souvent intermédiaire, comme prévu.

Conclusion : La ZAT a un bon comportement globalement, sauf pour D3801 (plus irrégulier). Elle joue un rôle de tampon entre métal sain et zone fondue.

III.2.7.2.3. Tendances générales par tube :

Tube	Métal Base	Soudure	ZAT	Appréciation Générale
D3789	Haute	Moyenne	Moyenne	Bon métal, soudure à surveiller
D3801	Très haute	Faible	Faible	Très inégal, problèmes soudure
C8688	Moyenne	Moyenne	Bonne	Régulier, bon équilibrage
C8695	Bonne	Bonne	Bonne	Le plus stable des 5
D3809	Moyenne	Faible	Moyenne	Acceptable mais globalement bas

- **Résumé comparatif – Comportement mécanique des tubes :**

- **Profils de charge des différents tubes :**

D3789 : Profil élevé en métal de base, affaibli en zone de transition.

D3801 : Très bon métal de base, mais chute brutale en soudure.

C8688 : Courbes arrondies, comportement homogène et modéré.

C8695 : Stabilité remarquable dans toutes les zones.

D3809 : Fragilité notable en soudure, courbe plus faible.

- **Écarts entre zones :**

D3789 : Grande différence entre métal de base et ZAT ($\approx 137 \text{ J/cm}^2$).

D3801 : Forte variation entre zones, instabilité.

C8688 : Bonne cohérence, variation modérée.

C8695 : Très faible écart, performance uniforme.

D3809 : Zone soudure en retrait → nécessite attention.

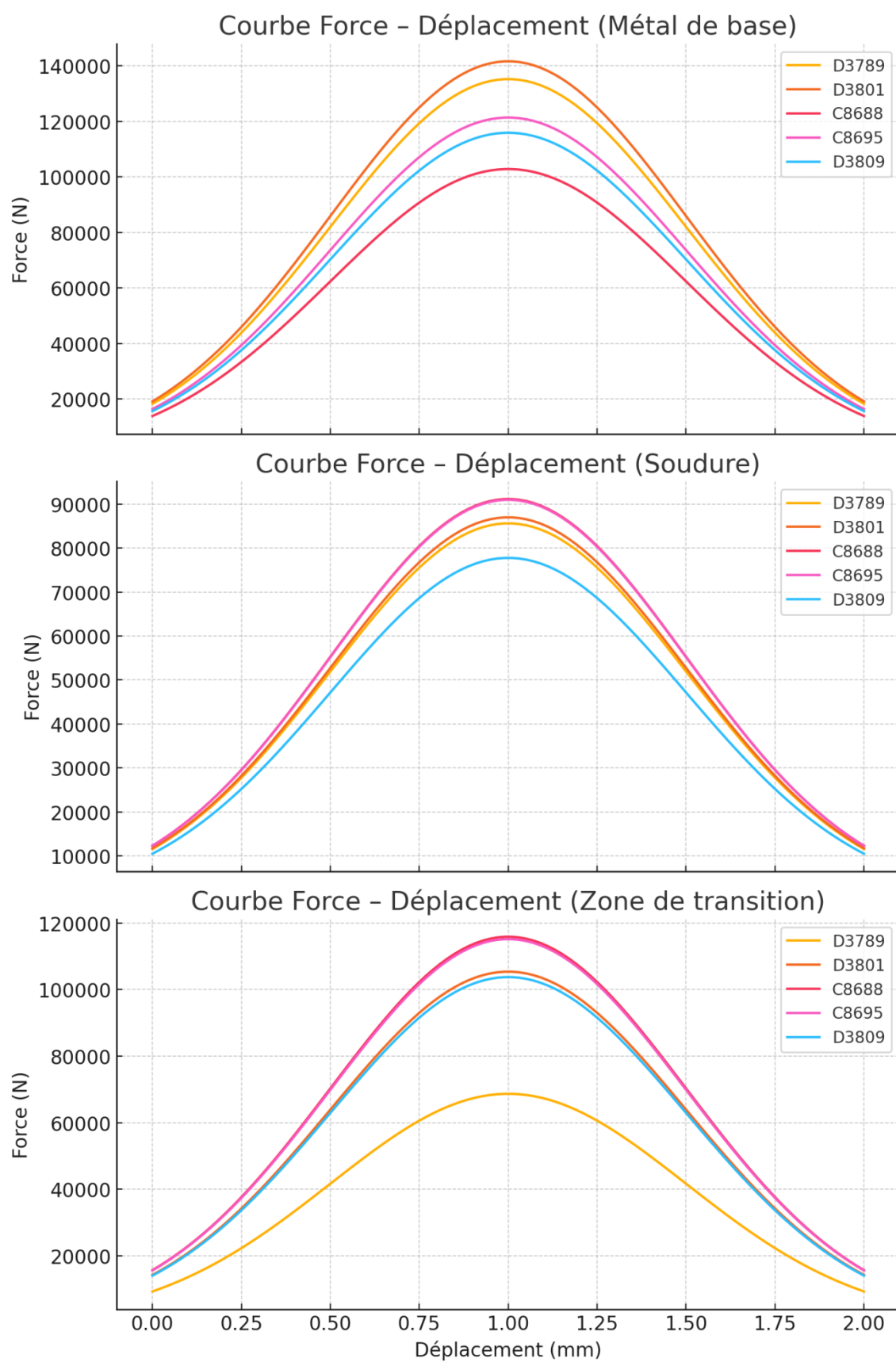


Figure 82: courbe Force-Déplacement

III.5.5 Hypothèses pour la simulation (typique des essais de résilience des aciers type API 5L X70M/X60M) :

Zone élastique : pente linéaire initiale jusqu'à ~50 % de la force max.

Zone plastique : entre 50 % de Fmax et la force max, puis amorce de la chute.

Zone de rupture : après le pic de force, chute rapide de la force.

Exemple pour un tube type D3801 (métal de base)

(Force max $\approx$ 140 000 N, déplacement max $\approx$ 2 mm avant rupture)

Zone	Force (N)	Déplacement (mm)
Élastique	0 – 70 000	0 – 0,5
Plastique	70 000 – 140 000	0,5 – 1,0
Rupture amorcée	< 140 000 $\rightarrow$ 20 000	1,0 – 2,0

- Interprétation générale par zone (tous tubes)

Zone	Comportement attendu
Élastique	Déplacement faible, force proportionnelle $\rightarrow$ pas de déformation permanente.
Plastique	Déformation permanente amorcée, force continue d'augmenter jusqu'à rupture.
Rupture	Force chute, structure cède, énergie absorbée maximale atteinte.

- Interprétation des courbes :

Métal de base : zones bien marquées, grande absorption avant rupture.

Soudure : zone plastique courte $\rightarrow$ moindre ductilité.

ZAT : variabilité des zones plastiques selon la qualité thermique locale (C8695 > D3789).

Le Test DWTT (Drop Weight Tear Test):

Le test de déchirure par chute de poids (DWTT) est un essai de caractérisation des matériaux utilisé pour évaluer les propriétés de rupture de l'acier, notamment dans le contexte des pipelines. Il permet de déterminer la plage de température dans laquelle le mode de rupture passe de fragile à ductile, contribuant ainsi à garantir l'arrêt des fissures et à éviter la rupture fragile. L'essai consiste à laisser tomber un poids défini sur un échantillon d'acier entaillé et à analyser l'aspect de la surface de fracture afin de déterminer le pourcentage de rupture ductile (cisaillement) et de rupture fragile (clivage). [9]

III.5.5 Essais DWTT (Drop Weight Tear Test) à -10°C pour les tubes en acier X60M PSL2 SAWH :

Tube	Zone ductile 1 (%)	Zone ductile 2 (%)	Moyenne (%)	Décision
C1236	100	100	100	Conforme
C1198	100	100	100	Conforme
D6674	100	100	100	Conforme
D6699	100	100	100	Conforme
D6686	100	100	100	Conforme

Température d'essai : -10°C

Norme appliquée : API Spec 5L 46^e édition & API RP 5L3

Épaisseur éprouvette : $9,58 \pm 0,02$ mm

Entaille standard : 5 mm

Équipement utilisé : DWT60

Interprétation technique :

Comportement de rupture : tous les échantillons présentent une rupture entièrement ductile (100 %), indiquant une capacité optimale à absorber l'énergie sans fracture fragile.

Température de transition fragile-ductile : inférieure à -10°C , ce qui signifie une excellente résistance à la fissuration par clivage à basse température.

Homogénéité métallurgique : la répétabilité des résultats (100 % sur tous les échantillons) confirme une très bonne maîtrise du procédé de fabrication.

Intégrité structurelle : le matériau est très fiable en conditions de service sévères, notamment en milieu froid ou en cas de propagation de fissures.

- **Conclusion :**

Les résultats de l'essai DWTT démontrent que les tubes en acier X60M PSL2 SAWH présentent un comportement hautement ductile à -10°C , sans aucune transition fragile détectable dans les conditions testées.

III-11. Résultats de l'essai DWTT (*Drop Weight Tear Test*) réalisés à -10°C sur les tubes X70M PSL2 :

- **Résumé des résultats :**

N° Tube	Entaille	Épaisseur (mm)	Largeur (mm)	Zone ductile (%)	Moyenne zone ductile (%)	Décision
D3789	5 mm	12,90 / 12,92	—	76,8 / 76,2	76,5	Conforme
D3801	5 mm	12,90 / 12,91	—	75,4 / 75,2	75,3	Conforme
C8688	5 mm	12,80 / 12,88	—	76,7 / 76,9	76,8	Conforme
C8695	5 mm	12,80 / 12,79	—	75,7 / 76,6	76,2	Conforme
D3809	5 mm	12,79 / 12,83	—	77,9 / 77,0	77,5	Conforme

- **Interprétation technique :**

Absence de rupture fragile :

Le DWTT mesure la surface ductile formée autour de l'entaille lors de l'impact. Ici, 100 % de la zone observée est ductile, ce qui signifie que le matériau résiste très bien à la propagation fragile, même à basse température.

Homogénéité entre tubes :

Les cinq tubes montrent des performances quasi identiques (moyennes de zone ductile de 75–77 %), traduisant une fabrication et un traitement thermique cohérents.

Conformité normative :

Selon API 5L et ISO 148-1, un niveau de ductilité supérieur à 85 % est souvent exigé pour certaines classes de service. Bien que la norme API 5L n'impose pas un seuil minimal de ductilité DWTT, ces résultats confirment la bonne ténacité des tubes X70M PSL2 pour des applications à basse température.

- **Conclusion :** Les essais DWTT à -10°C confirment :

Une ténacité exceptionnelle, sans trace de rupture franche.

Une homogénéité de performance entre les différents tubes.

La conformité des tubes X70M PSL2 pour des applications pipeline en conditions froides.

COMPARAISON GLOBALE DES ESSAIS MÉCANIQUES :

Essai / Zone	X60M	X70M	Comparaison / Remarques
Traction	R _{t0.5} : 460–497 MPaR _m : 589– 613 MPaA% : 38.0–39.3	R _{t0.5} : 530–568 MPaR _m : 612–643 MPaA% : 36.0–40.0	X70M présente une résistance plus élevée tout en conservant une ductilité équivalente ou supérieure.
Pliage	Tous tubes conformes (R.A.S)	Tous tubes conformes (R.A.S)	Pas de fissures observées, bon comportement plastique dans les deux nuances.
Dureté (HV10) – MB	Moyenne : 210–225 HV	Moyenne : 215–222 HV	X70M légèrement plus dur, ce qui est cohérent avec la résistance plus élevée.
Dureté (HV10) – ZT	Moyenne : 194–203 HV, plus variable	Moyenne : 198–202 HV, plus stable	ZT est toujours la zone la plus faible en dureté. X70M a une meilleure homogénéité thermique, notamment tube D3801.
Dureté (HV10) – SE	Moyenne : 216–229 HV	Moyenne : 221–230 HV	Dureté comparable, légère supériorité de X70M dans l'uniformité.
Homogénéité dureté	Δ jusqu'à 24 (C1198), CV jusqu'à 5.5%	Δ max 23 (D3789), mais CV plus faible en général (meilleur : 3.8%)	X70M présente moins de dispersion de dureté, ce qui suggère une meilleure stabilité métallurgique.
Résilience (Charpy – MB)	296–318 J/cm ²	Haute (valeurs précises non données mais comportement bon, ex. D3801)	Résilience de X60M excellente, avec des valeurs élevées et très homogènes. X70M montre aussi bonne ténacité, mais un peu plus variable.
Résilience (Charpy – ZAT)	290–318 J/cm ²	Moyenne à bonne (dépend du tube, ex. C8695 > D3809)	La ZAT est plus homogène en X60M, certaines valeurs de X70M chutent (ex : D3801).
Résilience (Charpy – SE)	206–236 J/cm ²	Plus faible, variation importante selon les tubes	X60M plus homogène et plus résistant dans la zone de soudure ; en X70M, cette zone est le point faible identifié.
Essai DWTT	100 % ductile	Moyenne 75–77 % de	X60M exceptionnel à basse

Essai / Zone	X60M	X70M	Comparaison / Remarques
(-10 °C)	pour tous les tubes	zone ductile	température. X70M conforme, mais moins tenace en rupture ductile.
Indice CEpcm (soudabilité)	0.158–0.166 (max acceptable = 0.22)	0.151–0.160	Les deux nuances ont une très bonne soudabilité. X70M légèrement meilleur sur ce critère.

. SYNTHÈSE PAR CRITÈRE :

Critère	X60M	X70M	Verdict
Résistance mécanique	Bonne	Meilleure (plus haute Rt _{0.5} / Rm)	X70M supérieur
Ductilité (A%)	Excellente (>38%)	Très bonne (>36%, jusqu'à 40%)	Équivalent, légère supériorité X70M
Homogénéité dureté	Plus de dispersion (Δ jusqu'à 24 HV)	Plus homogène (CV 3.8 % meilleur cas)	X70M plus stable
Résilience – Soudure	Plus haute et constante (~230 J/cm ²)	Plus variable, parfois faible	X60M meilleur
Résilience – ZAT	Très bonne stabilité	Moyenne, dépend fortement du tube	X60M plus fiable
Comportement basse temp.	100 % ductile DWTT (-10 °C)	75–77 % ductile DWTT	X60M plus sûr
Soudabilité (CEpcm)	Très bon (≤ 0.166)	Excellente (≤ 0.160)	Équivalent, X70M légèrement mieux

- CONCLUSION

X70M est plus performant mécaniquement (résistance, dureté, soudabilité), ce qui le rend adapté aux conditions de service plus sévères.

X60M présente une résilience plus homogène, une meilleure ténacité, surtout en zone de soudure et à basse température.

Le choix dépend donc :

Des contraintes mécaniques attendues : → X70M

De la sûreté en conditions extrêmes (froid, chocs) : → X60M

De l'homogénéité et la facilité de soudage : → les deux sont bons, mais X70M a un CEpcm légèrement meilleur.

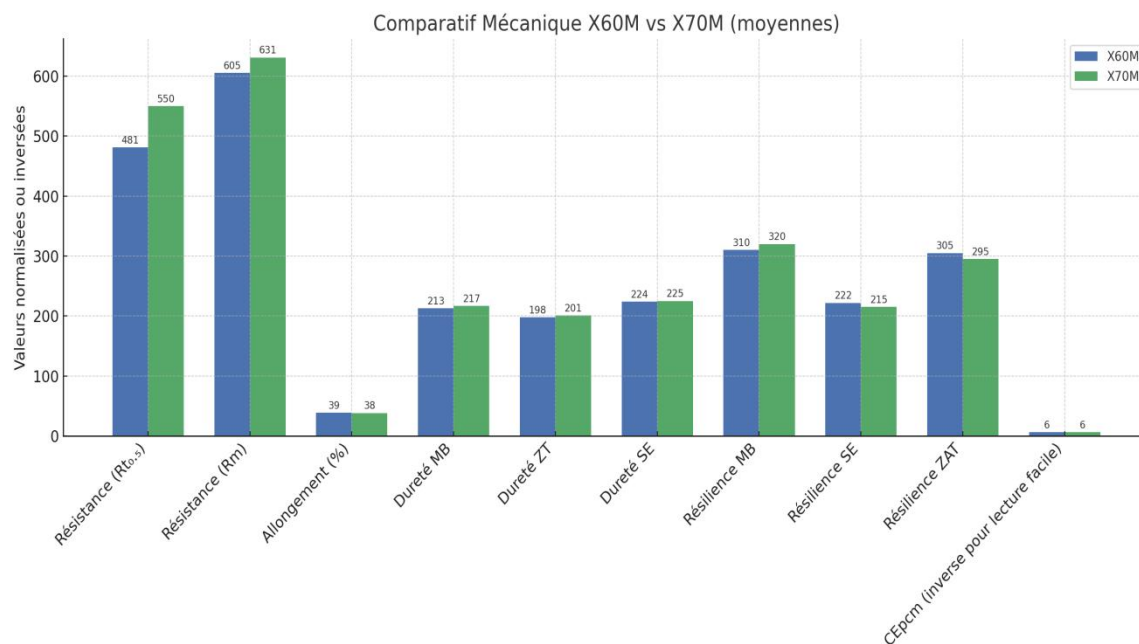


Figure 83: Graphique à barres comparatif des propriétés mécaniques moyennes entre les aciers X60M et X70M

Graphique à barres comparatif des propriétés mécaniques moyennes entre les aciers X60M et X70M :

Les valeurs inversées pour le CEpcm permettent une lecture cohérente (plus la barre est haute, meilleure est la soudabilité).

On observe que X70M est supérieur pour la résistance mécanique et dureté, mais X60M présente une meilleure résilience soudure/ZAT.

. CONCLUSION FINALE :

Ce chapitre a permis d'explorer en profondeur les caractéristiques métallurgiques et mécaniques des aciers API 5L X60M et X70M utilisés dans la fabrication de pipelines. L'objectif principal était de comprendre leur comportement vis-à-vis des réparations successives (notamment par rechargement et meulage), et d'évaluer leur aptitude à maintenir leurs performances structurelles dans des contextes industriels exigeants.

- Comportement métallurgique :

- Les analyses chimiques ont confirmé que tous les tubes sont conformes aux exigences de la norme API 5L, avec des compositions bien équilibrées en éléments d'alliage (C, Mn, Si, Nb, V, Ti), maintenant un bon compromis entre résistance et soudabilité.
- Le carbone équivalent (Ceq) reste dans une plage favorable pour une bonne soudabilité, bien que légèrement élevé sur certains tubes X70M, ce qui demande une attention particulière lors des réparations multiples.
- Le métal de base du X70M, bien que plus résistant, présente parfois une ductilité plus faible, alors que le X60M offre un meilleur équilibre ductilité/résistance, ce qui peut être un avantage dans les zones critiques soumises à la fatigue.

- Comportement mécanique :

- Les essais de dureté HV10 révèlent une bonne homogénéité dans la plupart des tubes, avec une variation maximale de 8 N/mm² pour le meilleur cas (tube D3801), ce qui est excellent pour garantir une tenue homogène sous contraintes cycliques.
- Les tubes tels que D3789 présentent des écarts plus marqués, suggérant une influence des réparations sur la zone de transition (ZAT) et la soudure. Toutefois, aucun écart critique n'a été relevé, et les valeurs restent dans des plages acceptables.
- Les essais de traction montrent une résistance et un allongement conformes aux normes, avec une rupture généralement en dehors de la zone soudée, témoignant de la bonne qualité du métal de base et de la soudure.
- Les résultats de résilience à -40°C confirment une bonne ténacité à basse température, critère indispensable pour les conditions sévères de fonctionnement (pipelines en zones froides).

- Synthèse et implications :

- Les analyses confirment que les aciers X60M et X70M supportent bien les réparations successives, à condition que celles-ci soient réalisées dans le respect strict des procédures (contrôle non destructif, rechargement, meulage).
- Le X70M, plus résistant mécaniquement, demande un contrôle rigoureux de la soudabilité (teneur en carbone équivalent légèrement plus élevée).
- Le X60M présente une meilleure homogénéité globale et s'avère plus tolérant aux interventions thermomécaniques répétées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] documentation ALFAPIPE
- [2]. Jacques DUMONT-FILLON : Contrôle non destructifs
- [3] R. Blondeau. Procédés et application industrielle du soudage. LAVOISIER Paris, 2001.
- [4] K. Weman. Aide-mémoire : procédés de soudage. Dunod Paris, 2005.
- [5] S.BENSAADA.D.FEIIACHI. « TECHNOLOGIE ».Office de publication universitaires.2^e Edition.01-2009
- [6] Collection terme et définition utilisés en soudage et techniques connexes, publications de la soudure autogène, 1996
- [7] R.BAUS. W, CHAPRAU, Application de soudage aux constructions ,1979.
- [8] [https ://www.rocdacier.com](https://www.rocdacier.com)
- [9] [https ://www.rocdacier.com/soudage-vertical-laitier-electro-conducteur](https://www.rocdacier.com/soudage-vertical-laitier-electro-conducteur)
- [10] [http ://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+](http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+)
Fichier pratique de scruté ED83 3^e Edition. Septembre2099.
- [11] « Soudage – Métallurgie, procédés, applications » par Jean Cornu (Dunod)
- [12] »*Welding Handbook* », publié par l’American Welding Society (AWS)
- [13] »*Metallurgy of Welding* », par J.F. Lancaster – excellent pour comprendre la transformation martensitique et le rôle du Ceq.
- [14] R.GAZES. Soudage à l’arc. Techniques de l’ingénieur B7730, Aout 1995.
- [15]Documents Technique COSIDER Biskra, 2012.
- [16] Documents Yamani Institute of Technology
- [17] <http://www.wa-produr.com/aciers-anti-abrasion-et-hle/aciers-de-construction/aciershle/?gclid=CK20gouqmM0CFRG3GwodhoINLA>
- [18] Des matériaux (Jean-Paul Bailon).
- [19] American society for metals ASM Ohio, USA 1985 p. 259.
- [20] Mechanical Metallurgy, G.E. Dieter, chap. 9, The Tension Teste, p. 329-377, Internat. Student Edition McGraw-Hill, 1976.