



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشاذلي بن جديد
تيس

Mémoire

Présentée pour obtenir le diplôme de

Master

Spécialité : Génie des matériaux

Filière : Génie mécanique

L'étude de l'effet de brunissage à bille sur l'état de surface de l'acier X 70

Présenté par :

KARKOUD Sara

Mémoire soutenue le 09/06/2026 devant le jury composé de :

Président :	DIHA Abdallah	MCA	Université Larbi Tébessi-Tébessa
Encadreur :	BOUNOUARA Abd Elouahab	MCB	Université Larbi Tébessi-Tébessa
Examineur :	LEMITA Nour el Houda	MCB	Université Larbi Tébessi-Tébessa

Année universitaire:2025/2026

Table des matières

Résumé	1
Introduction Générale	4
Chapitre 1 : Généralités Sur Les Aciers	6
Introduction	7
1. Définition de l'acier	7
2. Classification des aciers	7
3. Les aciers à haute limite élastique (HLE)	8
4. Structure et propriétés des aciers HLE	8
4.1 La Dureté	8
4.2 La Ductilité	8
4.3 La Ténacité	9
5. Mécanismes de durcissement des aciers HLE	9
5.1. Solution solide	9
5.2. Précipitation	9
5.3. Dispersion	10
5.4. Affinement du grain	10
5.5. Traitements thermiques	10
6. Caractéristiques des aciers HLE pour pipelines	10
6.1 Propriétés mécaniques	10
6.2 Composition chimique	11
6.3 Propriétés métallurgiques	12
7. Avantage des aciers HLE	16
8. Les applications des aciers HLE	16
8.1. Les pipelines	16
Conclusion	17
Chapitre 2 : Fabrication des tubes et contrôles	18
Introduction	19
1. Processus de fabrication des tubes soudées en spirale	19
1.1 Introduction	19
1.2. Les opérations principales pour la fabrication des tubes soudés en spirale	20
1.3. Différentes zones d'une entité de soudage	24
2. Différents types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations	25

2.1. Les fissures	26
2.2. Les éraflures	27
2.3. Les enfoncements	27
3. Corrosion des aciers	28
3.1. Types de corrosion	29
4. Contrôles non destructifs (CND)	31
4.1. Contrôles des bobines	31
4.2. Contrôles des tubes	31
5. Contrôles destructifs (CD)	34
5.1. Essais utilisés pour la caractérisation	34
5.2. Essai de traction	35
5.3. Essai de résilience	37
5.4. L'essai de dureté	39
6. Revêtement extérieur et intérieur	40
7. L'état des surfaces	42
7.1. Généralités	42
7.2. Défauts géométriques	42
7.3. Rugosité	43
7.4. Paramètres de rugosité	43
Conclusion	45
Chapitre 3 : Traitement Mécanique De Surface	46
Introduction	47
1. Principe du traitement mécanique de surface	47
2. Types de traitement mécanique de surface	48
2.1 Brunissage	48
2.2 Galetage	49
3. Brunissage à la bille	50
4. Conception et fabrication du dispositif de traitement mécanique de surface . .	52
5. Intérêt et paramètres du brunissage	54
6. Avantages et inconvénients du brunissage	54
A. Avantages du processus de Brunissage	54
B. Inconvénients du processus de brunissage	55
7. Applications Du Brunissage	56
Conclusion	57
Chapitre 4 : Matériau et Techniques Expérimentales	58
Introduction	59
1. Matériau	59
2. Composition chimique	59

3. Opération de Polissage	60
3.1. Pré-polissage	60
3.2. Polissage de finition	61
4. Attaque chimique	62
5. Essai de dureté	62
5.1. Résultats et interprétations	65
6. Essai de traction	76
6.1. Résultats et interprétation	78
7. Essai de résilience	81
7.1. Résultats et Interprétation	82
8. Effet de brunissage à l'état de surface de l'acier x70	84
8.1. Effet de brunissage sur la dureté	84
8.2. Effet de brunissage sur la résilience	85
Conclusion	88
Conclusion Générale	89
Bibliographie	91

Liste des figures

Figure 1.1	Pipelines des hydrocarbures	16
Figure 2.1	Stockage des bobines	20
Figure 2.2	Machine de préparation bobine	21
Figure 2.3	Le soudage	22
Figure 2.4	Oxycoupage de tube	23
Figure 2.5	Nettoyage du tube	23
Figure 2.6	Différentes zones de soudage	24
Figure 2.7	Rupture d'un pipeline	25
Figure 2.8	Éclatement d'un pipeline	25
Figure 2.9	Éclatement d'un pipeline (détail)	25
Figure 2.10	Soudure de raboutage dans une canalisation	26
Figure 2.11	Fissure dans des joints soudés [21]	26
Figure 2.12	Photo d'un pipeline enfoncé	27
Figure 2.13	Photo d'une éraflure	27
Figure 2.14	Photo d'une éraflure dans un enfoncement	28
Figure 2.15	Déformation	28
Figure 2.16	Corrosion généralisée	28
Figure 2.17	Corrosion par piqure	29
Figure 2.18	Corrosion dans la pipe interne et externe	30
Figure 2.19	Contrôle visuel	32
Figure 2.20	Contrôle par ultrasons	33
Figure 2.21	Contrôle radioscopie	33
Figure 2.22	Contrôle hydrostatique	34
Figure 2.23	Schéma de prélèvement des échantillons pour les essais destructifs	35
Figure 2.24	Dimension de l'éprouvette	36
Figure 2.25	Machines d'essais de traction	37
Figure 2.26	Les types d'éprouvette de résilience	37
Figure 2.27	La machine de Charpy et un cryothermostat	38
Figure 2.28	Principe de l'essai de charpy	38
Figure 2.29	Principe de l'essai de Vickers	39
Figure 2.30	Éprouvette de l'essai de dureté selon la norme API	40
Figure 2.31	Machine de dureté	40
Figure 2.32	Tube revêtu	41
Figure 2.33	Revêtement extérieur	41

Figure 2.34	Représentation schématique en coupe d'une surface	42
Figure 2.35	Défauts géométriques de différents ordres	43
Figure 2.36	Rugosité moyenne arithmétique	44
Figure 2.37	Rugosité totale moyenne	44
Figure 2.38	Rugosité totale maximale	44
Figure 3.1	Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille	47
Figure 3.2	Schéma de principe du brunissage	48
Figure 3.3	Schéma décrivant le procédé de galetage	49
Figure 3.4	Vue d'un dispositif de galetage à galets cylindrique	49
Figure 3.5	Diagramme de l'affectation du brunissage sur la pièce	50
Figure 3.6	Photo montage de l'outil de brunissage sur la fraiseuse a) fraiseuse verticale, b) photographie du dispositif	51
Figure 3.7	Étalonnage de dispositif de brunissage	51
Figure 3.8	Dispositif de traitement mécanique de surface a) Schéma de principe, b) photographie du dispositif, c) photo de mise en œuvre . . .	52
Figure 3.9	Application de Brunissage	56
Figure 4.1	Papiers abrasifs de différentes granulométries utilisés pour le pré-polissage.	60
Figure 4.2	Polisseuse mécanique de type BUEHLER METASERV utilisée pour la finition des échantillons.	61
Figure 4.3	Composé de diamant (Diamond Compound) utilisé pour le polissage de finition.	61
Figure 4.4	État final des échantillons (MB, ZAT, Soudure) après polissage. . .	61
Figure 4.5	Attaque chimique superficielle de l'acier X70 par le réactif Nital (3%).	62
Figure 4.6	Machine de dureté universelle type KB 250 (Laboratoire de l'Université Larbi Tébéssi, Tébéssa)	63
Figure 4.7	Mise au point optique sur la surface	63
Figure 4.8	Application de la charge (HV10) par l'indenteur pyramidal en diamant.	64
Figure 4.9	Interface de contrôle et analyse des indentations via HardwinXL. . .	65
Figure 4.10	Profil d'évolution de la micro-dureté Vickers HV 10 à l'état d'usinage (MB, ZF et ZAT)	66
Figure 4.11	Empreintes de micro-dureté Vickers HV10 obtenues sur le Métal de Base (MB) à l'état d'usinage	67
Figure 4.12	Empreintes de micro-dureté Vickers HV10 obtenues sur la Zone de Fusion (ZF) à l'état d'usinage	68
Figure 4.13	Empreintes de micro-dureté Vickers HV10 obtenues sur la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) à l'état d'usinage	69

Figure 4.14	Profil d'évolution de la micro-dureté Vickers (HV10) après brunissage à bille (MB, ZF et ZAT)	70
Figure 4.15	Empreintes de micro-dureté Vickers (HV10) obtenues sur le Métal de Base (MB) à l'état de brunissage	71
Figure 4.16	Empreintes de micro-dureté Vickers (HV10) obtenues sur la Zone de Fusion (ZF) à l'état de brunissage	72
Figure 4.17	Empreintes de micro-dureté Vickers (HV10) obtenues sur la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) à l'état de brunissage	73
Figure 4.18	Comparaison de la micro-dureté Vickers (HV10) entre l'état d'usinage et de brunissage pour le Métal de Base (MB)	74
Figure 4.19	Comparaison de la micro-dureté Vickers (HV10) entre l'état d'usinage et de brunissage pour la Zone de Fusion (ZF)	75
Figure 4.20	Comparaison de la micro-dureté Vickers (HV10) entre l'état d'usinage et de brunissage pour la Zone Affectée Thermiquement (ZAT)	75
Figure 4.21	Méthode de prélèvement des échantillons du tube soudé en spirale en diamètre de 1219 mm, acier X70 norme API 5L, 1) échantillons de traction, 2) échantillons de résilience	76
Figure 4.22	Géométrie d'éprouvette de traction en acier X70.	77
Figure 4.23	Géométrie de l'éprouvette de traction en acier X70 selon la norme API	77
Figure 4.24	Essai 1 – Courbes contrainte-déformation comparées de l'éprouvette TN 1.1 (métal de base) et de l'éprouvette TS 1.2 (contenant le cordon de soudure).	79
Figure 4.25	Essai 2 – Courbes contrainte-déformation comparées de l'éprouvette TN 1.1 (métal de base) et de l'éprouvette TS 1.2 (contenant le cordon de soudure).	79
Figure 4.26	Essai 3 – Courbes contrainte-déformation comparées de l'éprouvette TN 1.1 (métal de base) et de l'éprouvette TS 1.2 (contenant le cordon de soudure).	79
Figure 4.27	a) Machine d'essai de Charpy (Zwick), b) Four	81
Figure 4.28	Position de l'entaille en V dans les échantillons de résilience sur les trois zones de soudage, a) métal de base, b) zone de fusion, c) zone affectée thermiquement	81
Figure 4.29	Mise en place d'éprouvette	82
Figure 4.30	Effet de la température sur l'énergie absorbée dans les éprouvettes usinées (MB, ZF et ZAT)	83
Figure 4.31	Aspect de surface de l'acier X70 : a) État après usinage (fraisage), b) État après l'opération de brunissage	84
Figure 4.32	Géométrie d'indentation	85

Figure 4.33	Effet de la température sur l'énergie absorbée dans les éprouvettes usinées (MB, ZF et ZAT)	86
Figure 4.34	Effet de la température sur l'énergie absorbée dans les éprouvettes traitées par brunissage	87
Figure 4.35	Effet du brunissage sur la résilience	88

Liste des tableaux

Table 1.1	Propriétés mécaniques des aciers pour tubes selon la norme API . . .	11
Table 1.2	Composition chimique de l'acier X70	11
Table 1.3	Caractéristiques mécaniques de l'acier X70 selon l'API 5L	12
Table 1.4	Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers	15
Table 2.1	Paramètres de contrôle visuel	32
Table 4.1	Composition chimique de l'acier X70 [36]	59
Table 4.2	Valeurs de micro-dureté Vickers HV 10 à l'état d'usinage pour les différentes zones du joint soudé	66
Table 4.3	Valeurs de micro-dureté Vickers (HV10) à l'état de brunissage pour les différentes zones du joint soudé	70
Table 4.4	Résultats des essais de traction – Éprouvettes TN	78
Table 4.5	Résultats des essais de traction – Éprouvettes TS	78
Table 4.6	Essai de résilience à différent température	83
Table 4.7	Essai de résilience à différent température	86
Table 4.8	Traitement mécanique	87

Résumé

Le présent travail porte sur l'étude de l'effet du brunissage à bille sur l'état de surface de l'acier X70 utilisé dans la fabrication des pipelines de transport d'hydrocarbures.

Après une présentation des caractéristiques métallurgiques et mécaniques de cet acier à haute limite élastique, ainsi que du procédé de fabrication des tubes soudés en spirale, une campagne expérimentale a été menée incluant des essais de dureté, de traction et de résilience, avant et après traitement par brunissage.

Les résultats obtenus montrent que le brunissage à bille améliore sensiblement la dureté superficielle, réduit la rugosité de surface et influence positivement la résilience du matériau, grâce aux contraintes résiduelles de compression introduites en surface.

Ce traitement mécanique de surface s'avère donc efficace pour améliorer les performances et la durabilité de l'acier X70 en conditions de service.

Mots-clés : Acier X70, brunissage à bille, état de surface, dureté, résilience.

ملخص

يركز هذا العمل على تأثير الصقل الكروي على جودة سطح فولاذ X70 المستخدم في تصنيع أنابيب نقل الهيدروكربونات.

بعد عرض الخصائص المعدنية والميكانيكية لهذا الفولاذ عالي المقاومة، بالإضافة إلى عملية تصنيع الأنابيب الملحومة حلزونياً، أُجريت دراسة تجريبية شملت اختبارات الصلابة، وقوة الشد، وقوة الصدم قبل وبعد عملية الصقل.

تُظهر النتائج أن الصقل الكروي يُحسّن بشكل ملحوظ صلابة السطح، ويقلل من خشونة السطح، ويؤثر إيجاباً على مقاومة الصدم للمادة، وذلك بفضل إجهادات الضغط المتبقية على السطح.

وبذلك، تُثبت هذه المعالجة الميكانيكية للسطح فعاليتها في تحسين أداء ومتانة فولاذ X70 في ظروف التشغيل.

الكلمات المفتاحية : فولاذ X70، الصقل الكروي، جودة السطح، الصلابة، مقاومة الصدم.

Abstract

This work focuses on studying the effect of ball burnishing on the surface condition of X70 steel used in the manufacture of hydrocarbon transport pipelines.

Following a presentation of the metallurgical and mechanical characteristics of this high-strength steel, as well as the spiral welded tube manufacturing process, an experimental campaign was conducted including hardness, tensile, and impact tests before and after burnishing treatment.

The results show that ball burnishing significantly improves surface hardness, reduces surface roughness, and positively influences the material's resilience, due to the compressive residual stresses introduced at the surface.

This mechanical surface treatment proves to be effective in improving the performance and durability of X70 steel under service conditions.

Keywords : X70 steel, ball burnishing, surface condition, hardness, resilience.

Introduction Générale

Dans le contexte industriel actuel, le transport des hydrocarbures par canalisations constitue un maillon fondamental de la chaîne énergétique mondiale. Les pipelines, soumis à des conditions de service particulièrement sévères, pressions internes élevées, environnements corrosifs et sollicitations mécaniques cycliques exigent des matériaux offrant un compromis optimal entre résistance mécanique, ductilité et soudabilité. C'est dans cette perspective que les aciers à haute limite élastique (HLE) [1], et en particulier l'acier X70, ont progressivement remplacé les aciers conventionnels dans la fabrication des tubes soudés en spirale destinés aux infrastructures pipelinières [2].

L'acier X70, dont la limite élastique minimale est de 485 MPa selon la norme API 5L, est aujourd'hui l'un des matériaux de référence dans le secteur pétrolier et gazier. Ses propriétés mécaniques remarquables résultent d'une composition chimique soigneusement contrôlée et de mécanismes de durcissement spécifiques tels que l'affinement du grain, la précipitation de carbonitrides et le durcissement par solution solide [3]. Néanmoins, la durabilité et la fiabilité de ces canalisations restent conditionnées non seulement par les propriétés intrinsèques du matériau, mais également par l'état de surface des tubes, lequel joue un rôle déterminant dans l'amorçage et la propagation des fissures, ainsi que dans la résistance à la corrosion.

Face à ces enjeux, le traitement mécanique de surface par brunissage à bille apparaît comme une solution prometteuse et économiquement avantageuse. Ce procédé consiste à faire rouler une bille dure sur la surface du matériau, induisant ainsi une déformation plastique superficielle qui génère des contraintes résiduelles de compression, affine la rugosité de surface et améliore la dureté superficielle, sans apport thermique ni modification de la composition chimique du matériau.

C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude, dont l'objectif principal est d'analyser l'effet du brunissage à bille sur l'état de surface de l'acier X70, à travers l'évaluation de ses propriétés mécaniques et microstructurales avant et après traitement.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en quatre chapitres complémentaires :

- Le **premier chapitre** présente une synthèse bibliographique sur les aciers HLE, leur classification, leur composition chimique, leurs mécanismes de durcissement et leurs applications dans le domaine des pipelines.

- Le **deuxième chapitre** est consacré au processus de fabrication des tubes soudés en spirale, aux différents types de défauts susceptibles d'affecter les canalisations, aux phénomènes de corrosion ainsi qu'aux méthodes de contrôle destructif et non destructif utilisées dans l'industrie.
- Le **troisième chapitre** traite des traitements mécaniques de surface, avec un accent particulier sur le brunissage à bille : son principe, ses paramètres opératoires, ses avantages et ses domaines d'application.
- Le **quatrième chapitre** présente les matériaux étudiés, les techniques expérimentales mises en œuvre — polissage, attaque chimique, essais de dureté, de traction et de résilience — ainsi que les résultats obtenus et leur analyse en termes de l'effet du brunissage sur les propriétés de surface de l'acier X70.

Chapitre 1

Généralités Sur Les Aciers

Introduction

Les aciers constituent la famille de matériaux métalliques la plus utilisée dans l'industrie moderne, en raison de leur polyvalence, de leur disponibilité et de leur coût relativement faible. Parmi ces matériaux, les aciers à haute limite élastique (HLE) occupent une place de choix dans les applications structurales exigeantes, notamment dans le domaine des pipelines de transport d'hydrocarbures. Ce premier chapitre a pour objectif de présenter les fondements théoriques relatifs à ces matériaux, en abordant successivement leur définition, leur classification, leurs propriétés microstructurales et mécaniques, ainsi que les différents mécanismes de durcissement qui leur confèrent leurs performances remarquables. Une attention particulière sera accordée aux caractéristiques spécifiques des aciers HLE destinés aux pipelines, notamment l'acier X70, qui constitue le matériau central de cette étude.

1. Définition de l'acier

L'acier est un alliage métallique principalement constitué de fer et de carbone, dont la teneur en carbone varie.

La quantité de carbone change pas mal choses dans l'acier. En dessous de 0,008 %, c'est plutôt malléable, et on appelle ça du fer. Au-dessus de 2,14 %, le carbone forme du graphite, ce qui rend le matériau cassant, et là, c'est de la fonte. Entre les deux, plus on ajoute de carbone, plus l'acier devient solide et dur. On parle alors d'aciers doux, mi-doux, mi-durs, durs ou extra-durs [1].

2. Classification des aciers

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation.

On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de ce classement, nous permet de recenser quatre familles d'aciers :

- Les aciers au carbone d'usage général.
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non.
- Les aciers à outils.
- Les aciers inoxydables.

Dans le cadre de cette étude, l'attention a été portée sur les aciers aux carbones utilisés dans la fabrication des tubes pour pipelines [2].

3. Les aciers à haute limite élastique (HLE)

Les aciers à haute limite élastique (HLE) sont particulièrement utilisés dans les structures soumises à de fortes sollicitations mécaniques nécessitant simultanément une réduction de masse [3], les aciers à grande limite élastique sont privilégiés par les bâtisseurs. Les aciers HLE sont des aciers hautement résistants qui sont obtenus grâce à l'incorporation d'éléments de micro-alliage (Niobium, titane, vanadium, etc...) afin de réduire l'utilisation du carbone, du manganèse, entre autres.

C'est pourquoi leur capacité à être soudés est supérieure. Les aciers HLE sont employés dans les applications où leurs avantages (résistance, capacité de déformation et aptitude au soudage) peuvent être mis à profit : transport, levage, etc. Ils permettent souvent de diminuer le poids [4].

4. Structure et propriétés des aciers HLE

4.1 La Dureté

Les principaux facteurs influençant la dureté sont :

- La teneur en carbone.
- La présence d'éléments d'alliage.
- Les conditions d'austénitisation (mise en solution des carbures et grosseur des grains d'austénite).

Les éléments d'alliage contribuent au durcissement par solution solide, en créant des distorsions du réseau cristallin du fer, ou par formation de précipités, généralement des carbures [5].

4.2 La Ductilité

La ductilité varie en raison inverse de la dureté. L'affinement du grain ou l'introduction d'une phase martensitique dans la ferrite sont des modes de durcissement qui permettent d'augmenter la résistance mécanique sans réduire trop la ductilité [6].

4.3 La Ténacité

On caractérise souvent la ténacité des aciers par la température de transition ductile-fragile. L'augmentation du taux de perlite diminue la ténacité en facilitant l'amorçage du clivage. Les structures bainitique et martensitique peuvent, grâce à un affinement supplémentaire des grains gamma, améliorer la résistance à la rupture [7].

5. Mécanismes de durcissement des aciers HLE

Pour répondre à toutes les exigences imposées par les multiples applications de l'acier, celui-ci doit posséder un grand nombre de caractéristiques pour un bas prix de revient. L'unique moyen d'alléger les constructions consiste à utiliser des aciers de construction à caractéristiques améliorées, de même que le rendement des machines dépend dans une large mesure de la résistance de leurs éléments fortement sollicités [4].

On peut améliorer les caractéristiques de différentes façons :

5.1. Solution solide

Lorsqu'ils ne réagissent pas avec le métal de base, les atomes des éléments d'alliage peuvent soit prendre place sur les sites naturels du réseau de la matrice (en formant des solutions solides de substitution), soit se glisser entre ces sites (en formant une solution solide d'insertion). La distorsion du réseau qui en résulte le durcit. Le durcissement peut également provenir du fait que ces atomes de soluté se trouvent plus volontiers au voisinage de défauts du réseau (lacunes et dislocations), dont ils ralentissent le mouvement. Une solution solide d'insertion semble provoquer un durcissement plus important qu'une solution solide des substitutions, car elle entraîne des distorsions du réseau plus importantes [8].

5.2. Précipitation

Il durcit par précipitation lorsque les éléments d'alliages réagissent avec le carbone ou l'azote. Les précipités qui se forment s'opposent aux mouvements des dislocations, ou du moins en ralentissent les mouvements. Ces composés peuvent précipiter de façon cohérente (alors les distorsions du réseau sont importantes et affectent fortement la résistance et la fragilité) ou de façon non cohérente (alors l'effet est plus faible, car les contraintes se relâchent) [9].

5.3. Dispersion

Si les précipités sont très fins (de 50 à 500 Å) et bien dispersés dans la matrice, ils peuvent provoquer une consolidation très importante. On a appelé ce genre de précipitation dispersion. Ce terme, emprunté à la morphologie des particules, a été élargi à des structures qui ne sont pas le produit d'une réaction de précipitation [9].

5.4. Affinement du grain

Certains éléments, les carbures et les nitrures, empêchent tout grossissement de grains au cours du chauffage. Cela donne une structure à grains fins qui oppose beaucoup plus d'obstacles au mouvement des dislocations, car l'énergie à fournir pour traverser un joint de grains est plus grande que celle à fournir pour traverser une particule précipitée. Il convient de noter que le seul mécanisme ayant une influence favorable sur toutes les caractéristiques (limite d'élasticité, résilience...) est l'affinement du grain [9].

5.5. Traitements thermiques

On peut beaucoup améliorer les caractéristiques de l'acier par un traitement thermique. Selon le diagramme TTT, on peut obtenir des structures et des grosseurs de grains différentes suivant le taux de refroidissement. Une restauration peut atténuer les effets de la trempe, tandis qu'un recuit permet d'atténuer les effets d'une déformation par recristallisation ou restauration, et par précipitation de phases dispersées. Les aciers alliés au chrome, molybdène, nickel... ont une forte trempabilité et donc une grande aptitude aux traitements thermiques [9].

6. Caractéristiques des aciers HLE pour pipelines

6.1 Propriétés mécaniques

Les qualités d'acier communément utilisées pour la construction des pipelines sont établies dans deux spécifications API, adoptées depuis 1992 par l'industrie pétrolière américaine et désignées :

- 5L pour les qualités ordinaires.
- 5LX pour les qualités à haute résistance [10].

Les qualités d'acier les plus utilisées ont les propriétés mécaniques suivantes présentées au (Table 1.1) :

TABLE 1.1 – Propriétés mécaniques des aciers pour tubes selon la norme API [10]

Spécification API	Grade	Limite d'élasticité (MPa)	Résistance à la rupture (MPa)
5L	A	206	422
5L	B	245	412
5LX	X42	284	412
5LX	X46	314	441
5LX	X52	363	461
5LX	X56	382	510
5LX	X60	402	539
5LX	X65	448	530
5LX	X70	483	566
5LX	X80	551	620

6.2 Composition chimique de l'acier x70

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 (Table 1.2).

TABLE 1.2 – Composition chimique de l'acier X70 [11]

Elément	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
Elément	Nb	Ti	V	W	Sn	B	Fe	V+Nb	S+D	Ceq	
Value	0.053	0.007	0.063	0.003	0.604	0.001	97.8	-	0.0073	0.36	

TABLE 1.3 – Caractéristiques mécaniques de l'acier X70 selon l'API 5L

Caractéristiques API 5L	EPAISSEUR Mm	Re (MPa)	Rm (MPa)	A(%)	Rc/Rm
X70	5-25	485-605	570-605	≥ 18	0.90

Avec :

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

6.3 Propriétés métallurgiques

6.3.1 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 qui entrent dans la composition chimique de ces aciers sont : le Carbone, le Manganèse, l'Aluminium, le Silicium et le Molybdène [12].

6.3.2 Influence des éléments de substitution

a. Le manganèse :

Du fait de ces propriétés, le manganèse entre dans la composition de presque tous les aciers, au moins en petite quantité, et joue un rôle déterminant dans la fabrication de l'acier. Il prend part à la désoxydation, réagit avec le soufre (désulfurant donc), évitant ainsi la fissuration à chaud, pendant la fusion de l'acier, il absorbe les gaz, détruit en forte dose les oxydes qu'on trouve dans le bain en fusion et contribue ainsi à la formation d'un métal dense et sans soufflures et régissant l'état inclusionnaire du métal. Il se présente sous des formes multiples :

- Il diminue la teneur en carbone à l'eutectoïde.
- Il rend la ferrite plus dure en solution solide et change la solubilité du carbone et de l'azote dans cette phase.
- Il empêche la formation de carbures inter granulaires fragilisant.
- Il élargit le domaine de métastabilité de l'austénite et retarde ainsi le début de la transformation en conditions isothermes à la fois dans le domaine ferritique et dans le domaine bainitique.
- Il est très efficace sur la trempabilité, surtout si on veut éviter soit un grossissement du grain soit une augmentation du taux d'austénite résiduelle.

- Il augmente favorablement la résistance à la rupture.
- Il diminue la sensibilité au vieillissement après écrouissage puisqu'il abaisse les températures auxquelles la transformation s'effectue. Pour les aciers à haute limite élastique (acier au Nb, V), sa teneur est de l'ordre de 1,5 % ; il fixe le soufre sous forme de MnS insoluble dès la solidification [12].

b. Le silicium :

On le trouve à faible teneur dans les aciers, où il sert alors de désoxydant. Sa teneur plus forte lui donne une meilleure résistance à l'oxydation et lui confère certaines propriétés particulières (meilleure perméabilité). Il endurecit l'acier, mais il l'empêche de souder. Les aciers qui contiennent le Si et le Mn, s'appellent mangano-siliceux, ils ont la capacité, après traitement thermique, de présenter un taux élevé d'allongement élastique. Ils sont beaucoup plus résistants que les aciers au carbone et ils supportent une trempe énergétique sans risque d'éclatement moléculaire. L'effet d'endurcissement du silicium en solution solide est aussi marqué que celui du manganèse et, en outre, le silicium accroît la trempabilité qu'il faut maîtriser pour améliorer la soudabilité (la teneur maximale dans le cas des aciers à dispersoïdes au Nb-V est de l'ordre de 0,3 %) [12].

c. Molybdène :

Il s'agit d'un gène alpha qui présente une propension à former des carbures et qui augmente de manière significative le potentiel de durcissement des aciers. Il déplace le domaine perlitique vers la droite tout en exerçant une influence minimale sur la position du domaine bainitique ; le molybdène est donc particulièrement avantageux pour la réalisation de structures bainitiques. À des concentrations comparables, sa contribution dépasse celle du chrome [12].

6.3.3 Influence des éléments formant des précipités**a. L'aluminium :**

Il agit principalement comme agent désoxydant ; l'importance du nitrure d'aluminium, qui empêche la prolifération des structures de grains austénitiques, est bien établie. Tout comme le chrome, l'aluminium améliore la résistance à l'oxydation des alliages d'acier ; il peut participer à des mécanismes de durcissement spécifiques (effet durcissant) [12].

b. Le vanadium :

En petite quantité, cet élément permet d'accroître la dureté des aciers sans pour autant nuire à leur allongement ou à leur résilience. Il agit comme un désoxydant puissant, ce qui contribue à améliorer la qualité finale de l'acier. Une teneur en vanadium comprise entre 0,5 et 0,7 % suffit à modifier sensiblement ses propriétés. On observe alors une nette augmentation de la résistance à la traction et à la fatigue, tandis que l'acier devient moins sensible aux tapures de trempe. De plus, cet élément contribue à relever la température, évitant ainsi l'apparition de zones trop molles après traitement. Les carbonitrides de vana-

dium se mettent en solution à des températures avoisinant les 1000 °C, ce qui ne permet pas d'empêcher le grossissement du grain austénitique. Leur précipitation s'effectue en partie dans l'austénite et en partie dans la ferrite [12].

c. Le niobium :

Ce métal est résistant à la majorité des aciers et se présente sous forme d'alliages ferreux dénommés Ferroniobium, qui sont plus simples à intégrer lors de la fusion. Il a été démontré que l'incorporation d'une petite quantité (0,1%) de niobium dans des aciers à faible teneur de carbone permet d'augmenter favorablement la limite d'élasticité. Cette amélioration est attribuée au fait que ce métal présente une structure granulaire plus fine par rapport à l'acier de carbone de même type, et que cette performance a été réalisée, dans des produits laminés bien plus rentables grâce au niobium comparativement à toute autre méthode. L'endurance de ces articles favorise une diminution du poids et une économie de 20 à 30 %. Fournis sous forme de tôles et de barres, ils peuvent être perfectionnés par un traitement thermique, et ils possèdent une excellente soudabilité.

On l'utilise pour :

- ralentir la recristallisation de l'austénite en phase solide.
- La transformation de l'austénite en ferrite peut provoquer la formation de précipités. Cette précipitation produit un effet de durcissement tout en fragilisant. La présence de carbonitrides (carbures) de niobium non dissous inhibe l'expansion du grain austénitique avant le travail à froid [12].

d. Le titane :

Il produit des carbonitrides (carbures) et favorise la fixation de l'azote. Il s'associe au soufre pour former des sulfures non déformés. L'utilisation de cet élément nécessite une grande prudence, car il a tendance à générer d'importants précipités de nitrures qui ne se dissolvent pas, ce qui rend difficile d'éviter la fragilisation. Il a un effet de renforcement à l'état brut du laminage ; il inhibe la recristallisation dans l'austénite ou la ferrite ; il est utilisé pour affiner les grains lors d'une normalisation [12].

TABLE 1.4 – Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers [12]

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

6.3.4 Influence de la perlite

C'est la présence de carbone qui donne aux aciers leurs caractéristiques. Il n'est pas nécessaire d'ajouter du carbone comme complément, mais il doit être ajusté à la valeur souhaitée. Le carbone dissous a un impact significatif sur la solidification :

- La proportion de perlite est liée à la concentration en carbone et est conditionnée par les composants d'alliage en solution solide ; elle renforce considérablement l'acier, néanmoins son impact sur la limite d'élasticité est notablement plus faible, environ deux à trois fois moins.
- L'importance du carbone en ce qui concerne la résistance à la rupture fragile est considérable, car les couches de cémentite fonctionnent à la fois comme points de départ pour les fissures et pour leur développement [12].

7. Avantage des aciers HLE

- Très faible taux de carbone et bonne formabilité, leurs propriétés mécaniques permettent le formage sur presses et sur lignes automatisées.
- Ils se caractérisent également par une bonne résistance à la fatigue et au choc.
- Grâce à leur limite élastique élevée (R_e), ils sont très adaptés lorsqu'une réduction de poids est souhaitée, c'est pourquoi ces aciers sont souvent utilisés en remplacement des aciers de construction [9].

8. Les applications des aciers HLE

8.1. Les pipelines

Un pipeline (origine de l'anglais) est une canalisation composée de tubes en acier soudés bout à bout, destinée à transporter d'un endroit à l'autre des gaz ou des liquides ; ces tubes sont généralement recouverts extérieurement et même intérieurement, et presque toujours enterrés sauf dans certaines régions.



FIGURE 1.1 – Pipelines des hydrocarbures [13]

Un pipeline permet de transporter les produits entre raffineries, stocks pétroliers et ports. Sa longueur peut être de quelques kilomètres à plusieurs centaines de kilomètres, voire des milliers. Les pipelines se connectent souvent entre eux pour créer un réseau parfois très dense, une « toile d'araignée ». Les pipelines sont nommés selon le produit transporté. Leurs méthodes de construction et d'exploitation varient selon certaines règles. Les principaux réseaux de pipeline sont :

- Les gazoducs pour le transport du gaz naturel.
- Les oléoducs pour la circulation du pétrole et des hydrocarbures liquides.
- Les aqueducs, canalisations ou émissaires pour l'eau douce et l'irrigation [14].

Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension des aciers à haute limite élastique, et en particulier de l'acier X70. Il ressort que les performances mécaniques exceptionnelles de ces aciers — combinant résistance, ductilité et ténacité — résultent d'une synergie entre une composition chimique soigneusement contrôlée et des mécanismes de durcissement multiples, tels que l'affinement du grain, la précipitation de microalliages et le durcissement par solution solide. Ces propriétés font de l'acier X70 un matériau particulièrement adapté aux conditions sévères d'exploitation des pipelines. Le chapitre suivant sera consacré au processus de fabrication des tubes soudés en spirale à partir de ces aciers, ainsi qu'aux différents types de défauts pouvant affecter leur intégrité.

Chapitre 2

Fabrication des tubes et contrôles

Introduction

La fabrication des tubes destinés au transport des hydrocarbures est un processus industriel complexe qui requiert une maîtrise rigoureuse de chaque étape, depuis la mise en forme de la tôle jusqu'au contrôle final du produit fini. Ce deuxième chapitre est consacré à la description détaillée du procédé de fabrication des tubes soudés en spirale, en mettant en évidence les différentes zones de soudage et les paramètres opératoires critiques. Par ailleurs, une attention particulière est portée aux types de défauts susceptibles d'affecter l'intégrité des canalisations, notamment les fissures, les éraflures et les enfoncements, ainsi qu'aux phénomènes de corrosion qui représentent l'une des principales causes de dégradation en service. Enfin, les méthodes de contrôle non destructif et destructif utilisées pour garantir la qualité des tubes seront présentées et discutées.

1. Processus de fabrication des tubes soudés en spirale

1.1 Introduction

Les tubes sont fabriqués à partir de bobines laminées à chaud pesant entre 10 et 30 tonnes et ayant une largeur allant de 600 à 1800 mm, en fonction du diamètre du tube. Les bobines sont déroulées et mises à plat, puis façonnées en spirale avant d'être soudées par arc immergé sous flux en deux étapes distinctes sur un appareil appelé machine à souder en spirale.

La qualité des tubes soudés en spirale fabriqués par ALFA PIPE repose sur un contrôle qui débute à la réception de la matière première (bobine) et se poursuit jusqu'au produit fini (tube), conformément à la norme américaine API 5L, en passant par plusieurs étapes de contrôle. La technologie de fabrication des pipelines est élaborée en fonction de l'objectif et du type de pipeline. La technique la plus utilisée est la fabrication de tuyaux par soudure.

La diversité du réseau de transport gazier algérien s'explique par la multiplicité des diamètres et des épaisseurs de tubes et par le développement dans le temps de leurs techniques de fabrication. On distingue :

- Les tubes soudés en forme spirale
- Les tubes soudés en forme longitudinale
- Les tubes formés sans soudure [13].

1.2. Les opérations principales pour la fabrication des tubes soudés en spirale

1.2.1. Stockage des bobines

Le hall de stockage des bobines est équipé de deux lignes de chemin de fer et d'une ligne souterraine qui le relie directement au LAC. De plus, avec un pont roulant capable de supporter 44 tonnes, il peut contenir jusqu'à 15 000 tonnes de bobines, ce qui correspond à la consommation d'un mois et demi de production [12].



FIGURE 2.1 – Stockage des bobines [15]

1.2.2. Basculeur des bobines

Les bobines de tôle arrivant à axe verticale sont mises à axe horizontal sur cette installation pour pouvoir être préparées [12].

1.2.3. Machine de préparation bobine

Cette machine reçoit des bobines à axe horizontal par l'intermédiaire du pont roulant. Une fois la bobine positionnée, elle est déployée sur une longueur déterminée pour être soumise à diverses opérations : La première section de la bobine est découpée perpendiculairement le long de l'axe de la bande et elle est ensuite soumise à :

- Un contrôle des dimensions (épaisseur, etc.)
- Un contrôle visuel (traces, fissures, ...)
- Un examen par ultrasons pour identifier d'éventuelles anomalies internes (des doublures) [12].



FIGURE 2.2 – Machine de préparation bobine [13]

1.2.4. Machine à souder

La TUBERIE spirale est équipée de 4 machines à souder identiques, facilitant l'exécution de diverses opérations pour la production du tube [12].

1.2.5. Le rabotage

Il s'agit d'une procédure qui implique la séparation de la fine bande sur l'appareil à l'aide d'un oxycoupeur, puis le raccordement de l'extrémité de la bobine précédente à celle du nouveau par un soudage automatique sous flux [12].

1.2.6. Le Guidage

Quatre (4) galets de guidage commandés par hydraulique facilitent un ajustement rapide de la bande en cas de déviations causées par les changements de largeur de la bande [12].

1.2.7. Dressage bande

Un train de rouleaux dresseurs assurent une parfaite planéité et contribuent au guidage de la bande [12].

1.2.8. Cisaillage

Des cisailles de rive pour l'établissement final en largeur de la bande. Les chutes obtenues par cisaillage sont sectionnées grâce à la rotation de deux (02) tourteaux hacheurs, dotés de multiples lames en acier [12]. Stockage des bobines, Basculeur des bobines, Machine de préparation bobine, Machine à souder, Le rabotage, Le Guidage, Dressage bande, Cisaillage, Formage de la bande

1.2.9. Formage de la bande

La bande est mise en mouvement par deux rouleaux cylindriques et subit un préformage grâce à des galets cambreurs. Des bras de guidage équipés d'une plaque d'usure en téflon assurent le maintien de la bande. Celle-ci est insérée dans la cage de formage qui est composée de plusieurs séries de rouleaux, ajustés en fonction du diamètre à produire. Formée de cette manière, la bande est soudée à l'intérieur, puis une demi-spire après, à l'extérieur. On utilise une technique de soudage automatisé, à arc immergé sous flux ; un dispositif permet de récupérer le flux excédentaire pour un recyclage. Le tube formé est sectionné à la longueur désirée à l'aide d'un chariot d'oxycoupage conçu pour cette tâche [12].

1.2.10. Soudage des bandes

Une fois enroulées en hélice, les bandes sont soudées par le procédé à l'arc submergé sous flux (SAWH), en 2 passes successives, l'une à l'intérieur du tube, à l'accostage des rives, l'autre à l'extérieur, une demie spire plus loin. Les bords de bande à souder sont préparés sur le châssis amont de la machine, où sont installés les dispositifs de planage de la tôle, de cisailage et de freinage des vires. En raison des risques d'oxydation de la tôle lorsqu'on utilise des bobines importées, la machine dispose en outre de dispositifs de brossage énergétique de la face intérieure du tube et des rives après chanage freinage. Lors du soudage, l'accostage des rives est suivi par un système automatique réglant la fente de soudage.

La machine conçue pour passer des bandes ayant un cambrage de l'ordre de 25 mm sur une longueur de 10 m [16].



FIGURE 2.3 – Le soudage [16]

1.2.11. Oxycoupage des tubes

Quand le tube a atteint la longueur programmée, il est coupé à l'oxygène/propane automatiquement sur le châssis arrière de la machine spirale, puis évacué sur les grilles de stockage [16].



FIGURE 2.4 – Oxycoupage de tube [16]

1.2.12. Nettoyage tube

Le tube est nettoyé au moyen d'une machine qui le dépouille de toutes les impuretés (flux, laitier, etc.) [12].



FIGURE 2.5 – Nettoyage du tube [12]

1.3. Différentes zones d'une entité de soudage

1.3.1. Le métal de base

Au-delà de la zone affectée thermiquement, la température n'est pas assez haute pour causer une transformation structurale. On l'appelle aussi zone non affectée. La composition chimique de la zone fondue résulte essentiellement du métal de base et du métal d'apport, ajouté presque toujours lors du soudage. La dilution correspond alors à la proportion de métal de base dans cette zone fondue [17].

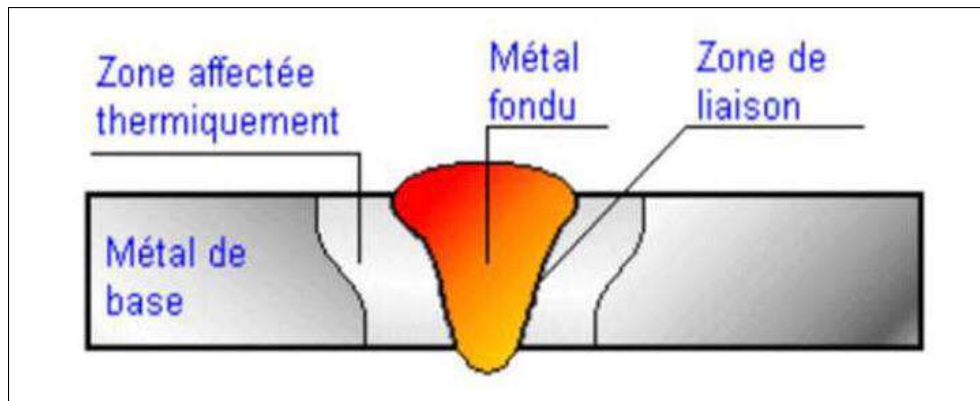


FIGURE 2.6 – Différentes zones de soudage [17]

1.3.2. La zone fondue

La zone fondue (ZF) est celle où le métal atteint l'état liquide, et où se forme la composition chimique. Sa structure métallurgique finale dépend du cycle de refroidissement. À l'intérieur, on observe des gradients de composition, du plus chaud vers le moins chaud. Cela permet d'examiner la composition d'une soudure et les variations de dureté [17].

1.3.3. La zone affectée thermiquement (ZAT ou ZAC)

La zone affectée thermiquement (ZAT ou ZAC) se situe en bordure de la zone fondue, sur une largeur variable. Elle subit une élévation de température sans fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement y provoquent des modifications plus ou moins marquées de la structure métallurgique [17].

Les variations des propriétés mécaniques entre le métal de base (MB), la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT) sont directement liées aux transformations microstructurales induites par le cycle thermique du soudage. La ZAT présente généralement une hétérogénéité structurale plus importante due aux gradients thermiques élevés [18].

2. Différents types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations

Les canalisations sont largement utilisées pour le transport de fluides et de gaz, constituant le mode d'acheminement le plus économique à ce jour. L'augmentation progressive de leur diamètre et de la pression de service accroît significativement le risque de rupture, initiée par des défauts préexistants. La combinaison d'un défaut dans une canalisation et de la pression interne peut entraîner une rupture localisée, provoquant une fuite et potentiellement une explosion. Parmi les défauts les plus courants, on distingue les cratères de corrosion, les fissures, les enfoncements, les éraflures et les défauts combinés (enfouissement + éraflures) [19].



FIGURE 2.7 – Rupture d'un pipeline [19]



FIGURE 2.8 – Éclatement d'un pipeline [19]



FIGURE 2.9 – Éclatement d'un pipeline [19]

2.1. Les fissures

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses études ont porté sur l'évaluation et le contrôle de la nocivité des défauts de surface dans les pipelines. Ces défauts, résultant de la corrosion, d'agressions mécaniques externes ou de défauts de soudure, sont souvent modélisés comme des fissures semi-elliptiques par conservatisme. Les canalisations sont généralement assemblées à partir de tubes d'acier soudés spiralement en usine, tandis que les soudures bout à bout (raboutage) sont effectuées sur chantier (voir **Figure 2.10**) [19].

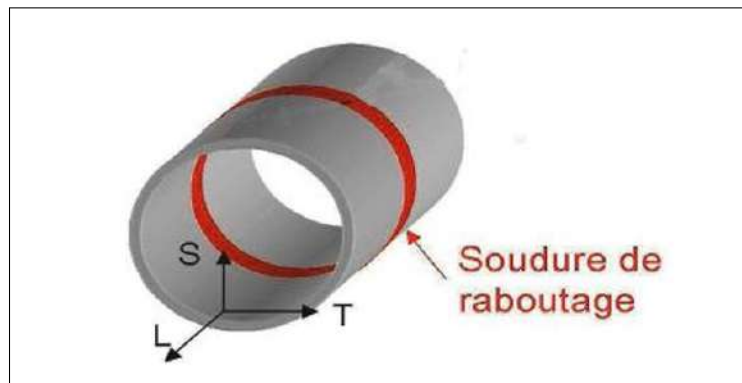


FIGURE 2.10 – Soudure de raboutage dans une canalisation [19]

Les soudures spirales, réalisées en usine, sont moins critiques en raison de leur contrôle préalable, contrairement aux soudures bout à bout sur chantier, souvent exécutées dans des conditions difficiles et non toujours inspectées. Les défauts dans les joints soudés, tels que le manque de pénétration de matière, sont assimilés à des fissures (voir **Figure 2.11**) [20].

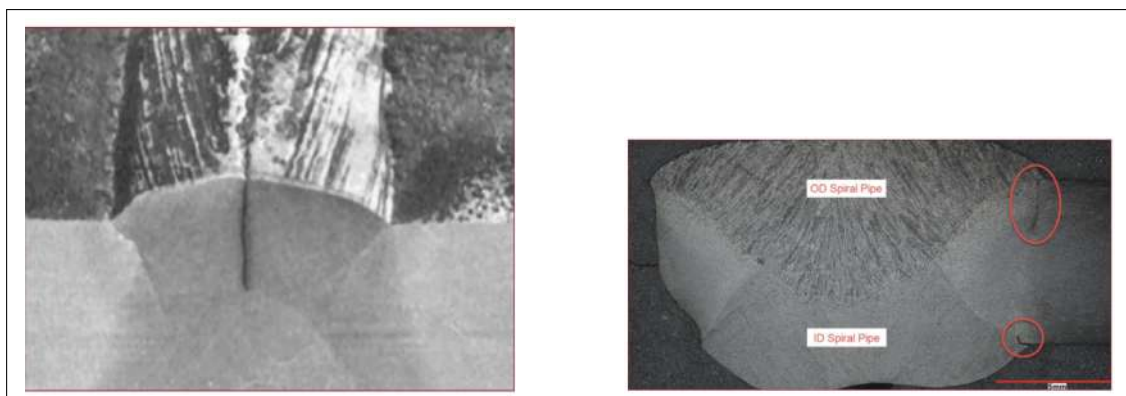


FIGURE 2.11 – Fissure dans des joints soudés [21]

2.2. Les éraflures

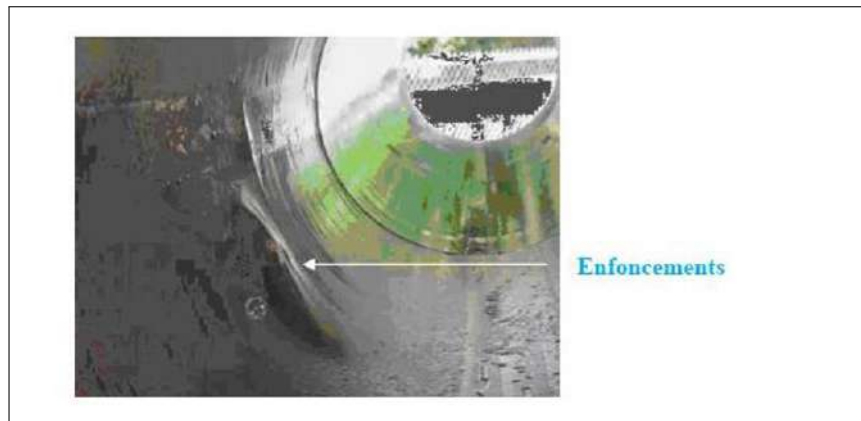


FIGURE 2.12 – Photo d'un pipeline enfoncé [19]

Durant les opérations de maintenance, des agressions mécaniques peuvent survenir par maladresse, négligence ou manque de précautions, exposant les tuyaux à des chocs d'outils ou d'engins (par exemple, coup de pic ou dent de godet, (voir **Figure 2.12**). Ces incidents passent souvent inaperçus ou non signalés. Une éraflure se définit comme un endommagement superficiel par enlèvement de matière, assimilable à une entaille, où la longueur excède la largeur. Sous l'effet de la pression en service, elle peut initier une rupture localisée, comme dans l'accident belge de l'été 2004 [20].

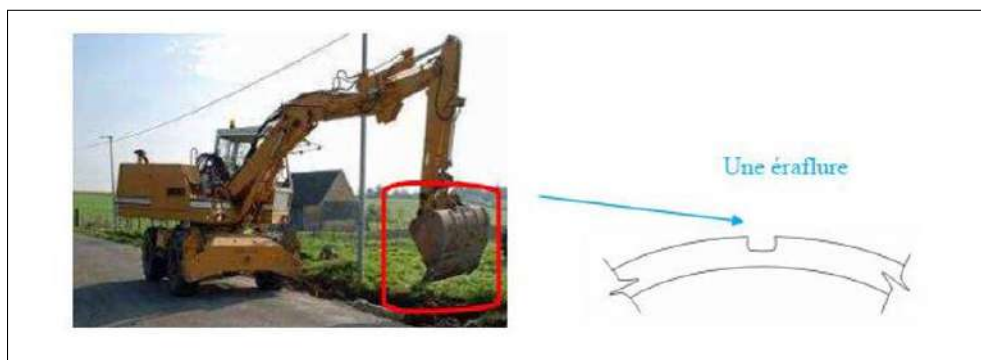


FIGURE 2.13 – Photo d'une éraflure [19]

2.3. Les enfoncements

Un enfoncement correspond à une déformation plastique permanente de la section du pipeline due à un contact avec un corps étranger, pouvant s'accompagner d'un enlèvement de matière et former un défaut combiné (enfoncement + éraflure, voir **Figure 2.14**). Ce type de défaut génère des non-linéarités géométriques et matérielles complexes [19].



FIGURE 2.14 – Photo d’une écaillage dans un enfoncement [19]

2.3.1. Les défauts combinés (enfoncements + écaillures)

La présence d’un défaut combiné est particulièrement dangereuse, car l’enfoncement concentre les contraintes et réduit le diamètre local, tandis que l’écaillage diminue l’épaisseur et la résistance mécanique globale de la canalisation [20].

3. Corrosion des aciers

La corrosion métallique désigne tout processus de dégradation des métaux et alliages impliquant leur environnement chimique, les ramenant à leur état naturel d’oxydes ou minerais. Elle résulte de l’interaction entre le métal et un milieu corrosif contenant de l’eau (électrolyte), comme les sols humides ou les fluides transportés. Ce phénomène électrochimique mobilise les électrons du métal et les ions de la solution à leur interface.

Sur les canalisations métalliques, la corrosion réduit l’épaisseur locale (voir **Figure 2.15** et **2.16**), favorisant les ruptures [19].



FIGURE 2.15 – Déformation [19]



FIGURE 2.16 – Corrosion généralisée [19]

3.1. Types de corrosion

Macroscopiquement, deux types principaux existent : la corrosion uniforme affectant l'ensemble de la structure, et la corrosion localisée, plus critique en raison de sa pénétration profonde sur les surfaces hétérogènes [19].

3.1.1. Corrosion électrochimique

Ce mécanisme dépend de la structure métallique et de la solution (pH acide, basique ou neutre), impliquant un courant électrique : déplacement d'électrons dans le métal et d'ions dans l'électrolyte [19].

3.1.2. Corrosion par piqûres

Elle se développe localement via une pile galvanique (surface passive cathodique vs. intérieur actif anodique), formant une cavité profonde malgré une dissolution globale limitée [19] (voir **Figure 2.16**).



FIGURE 2.17 – Corrosion par piqûre [19]

3.1.3. Corrosion par aération différentielle

Électrochimique, elle provient d'un gradient local d'oxygène (pile d'Evans), comme sous des gouttes d'eau salée sur une tôle de fer [19].

3.1.4. Corrosion galvanique

Survenant entre deux métaux dissimilaires ou zones hétérogènes d'un même métal en milieu aqueux, elle attaque le moins noble (anodique) au profit du plus noble (cathodique) [19].

3.1.5. Corrosion sélective

Elle cible préférentiellement un élément de l'alliage (ex. : cuivre-zinc), prévenable par protection cathodique [19].

3.1.6. Corrosion biologique

Implique des bactéries anaérobies avec l'oxygène, formant des sulfures et amplifiant les réactions électrochimiques [19].

3.1.7. Exemples de corrosion interne et externe

La corrosion des pipelines pétroliers et gaziers résulte du sol, de l'atmosphère, de l'eau ou des fluides internes (ex. : H_2S , CO_2 , bactéries sulfate-réductrices). Elle est complexe en raison des multiples paramètres électrochimiques. La figure suivante illustre ces formes internes et externes.



FIGURE 2.18 – Corrosion dans la pipe interne et externe [19]

4. Contrôles non destructifs (CND)

4.1. Contrôles des bobines

Cette identification permet d'assurer la traçabilité du produit réceptionné. Un marquage spécifique est utilisé pour isoler les bobines qui ne sont pas conformes. Un contrôle à la réception des bobines est effectué sur la base des spécifications techniques (forme, dimensions, défauts de surface tels que les empreintes et les griffures), de la liste de colisage et la spécification des bobines dans le but de s'assurer la conformité des bobines reçues avec les documents d'accompagnement. Une seconde vérification des documents d'accompagnement (certificats d'analyse chimique et mécaniques) fournis par le fournisseur.

Les bobines conformes sont consignées sur une liste de réception et sont distinguées par un marquage permanent incluant : le numéro de la bobine, le numéro de la coulée et le type d'acier. Masse de la bobine, Dimensions, Nom du fournisseur, Identification du projet [22].

4.2. Contrôles des tubes

Ces vérifications portent sur le métal primaire et le fil de soudure. Ils visent à détecter des défauts soit de manière directe (visuellement), soit de manière indirecte en observant leurs effets (visuels, magnétoscopie, ultrasons, radiographie...). Ces défauts sont des sortes de :

- Défauts tolérés (soufflures sphériques ou allongées, coupe d'arc...).
- Défauts non autorisés (insuffisance de pénétration, fissures, caniveaux...).

L'adéquation des tubes est contrôlée à la conclusion du processus de fabrication et avant leur distribution vers l'entrepôt par divers procédés de vérification [22].

4.2.1. Procédures de contrôle des tubes

Contrôle visuel : Le contrôle visuel est la méthode la plus élémentaire et initiale à déployer. Il sert à identifier les irrégularités de formes et autres anomalies qui apparaissent en surface des joints de soudure. L'examen est réalisé avec un éclairage d'au moins 350 lux. Les paramètres suivants sont pris en compte lors de l'évaluation métrologique des tubes soudés à l'arc sous flux en poudre [22] :

TABLE 2.1 – Paramètres de contrôle visuel [22]

PARAMETRE	METHODE DE MESURE
Diamètre (mm)	Micromètre (ruban gradué)
Epaisseur de la paroi (mm)	DM2 (micromètre)
Longueur (mm)	Double décimètre
Rectitude (mm)	Fil à plomb et règle
Equerrage des extrémités de tube (mm)	Equerre
Effet de toit (mm)	Comparateur
Dénivellation (décalage de soudure) (mm)	Comparateur
Hauteur du cordon de soudure (mm)	Calibre d'élévation
Largeur de cordon de soudure (mm)	Règle
Angle de chanfrein (mm)	Compas de chanfrein réglable
Talon de chanfrein (mm)	Règle
Enfoncement (mm)	Règle



FIGURE 2.19 – Contrôle visuel [22]

Contrôle ultrasons : L'examen par ultrasons est effectué sur le cordon de soudure, le métal de base et les bouts du tube pour identifier toute anomalie. Les résultats de l'inspection sont consignés automatiquement sur l'ordinateur et imprimés sur papier (rapport Ultrason ou numéro du tube y est reporté ; les indications de défauts sont signalées par des moyens acoustiques et visuels). Pour contrôler la fiabilité de l'installation ultrasonique, un tube étalon est passé périodiquement en contrôle début et fin de chaque poste de travail, l'inspecteur s'assurera que tous les défauts artificiels créés sur ce tube sont repérés lors du contrôle [22].

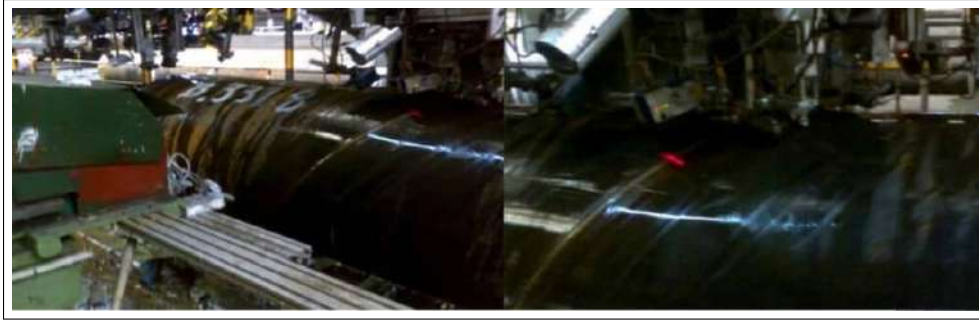


FIGURE 2.20 – Contrôle par ultrasons [22]

Contrôle Radioscopie : Champ d'application de la radioscopie. Ce contrôle s'appuie sur l'absorption différentielle des radiations X ou gamma. Les variations de rayonnement provenant de l'objet créent sur le film une « image latente » qui sera par la suite développée chimiquement. L'inspection radiographique des soudures se réalise dans deux salles équipées de rayons X. Le cordon de soudure est entièrement examiné par radioscopie. Toutefois, la détection de défauts entraîne une capture d'images. Un marquage permanent identifie l'emplacement de l'erreur. L'inspection des réparations et des indications d'ultrason, ainsi que l'examen des extrémités des tubes, se fait au niveau du département de radiographie [22].



FIGURE 2.21 – Contrôle radioscopie [22]

Contrôle hydrostatique : Avant toute épreuve non destructive finale, chaque tube est soumis à un test hydrostatique dans l'installation dédiée à ce contrôle (banc d'épreuve hydrostatique). Conformément à la réglementation algérienne (DDP), nous effectuons des tests sur les tubes jusqu'à 90% de leur limite élastique, en suivant les normes API 5L et selon les spécifications du client. Chaque tuyau doit être soumis à une pression d'essai de 118 bars pendant un minimum de 15 secondes. Les phases de l'épreuve sont automatiquement consignées grâce aux courbes [22].



FIGURE 2.22 – Contrôle hydrostatique [22]

Contrôle final : Il s'agit d'un contrôle visuel dimensionnel consistant en une inspection interne et externe de chaque tube, au cours de laquelle sont vérifiées les informations indiquées sur la carte du tube. Le tube est alors réceptionné ou classé, et un numéro séquentiel lui est attribué. Le contrôleur final veille au marquage des tubes conformément à la procédure en vigueur [22].

5. Contrôles destructifs (CD)

5.1. Essais utilisés pour la caractérisation

Les méthodes expérimentales visent à caractériser le comportement mécanique et la rupture de l'acier API 5L X70 employé dans le transport du gaz. Une étude générale des propriétés mécaniques et microstructurales de cet acier a d'abord été menée, suivie d'une description des éprouvettes et du dispositif expérimental permettant la réalisation d'essais de traction sur des éprouvettes normalisées. Des essais de résilience et de dureté ont également été conduits. Ces résultats sont présentés avec une validation numérique [9].

5.1.1. Prélèvement et dimensionnement des échantillons

Pour pouvoir mener à bien notre étude, il est nécessaire de préciser certains détails relatifs aux prélèvements d'échantillons et aux abréviations utilisées pour les analyses métallographiques, l'étude de corrosion, les essais de dureté et de résilience. Ainsi que les éprouvettes normalisées pour les essais de traction, représentées **Figure 2.23**. Echantillonnage et prélèvements d'éprouvettes Ce prélèvement peut se faire selon deux types : sur soudure (i) (ii) pour la caractériser. hors soudure afin de caractériser le matériau en question sans l'effet de la soudure [23].

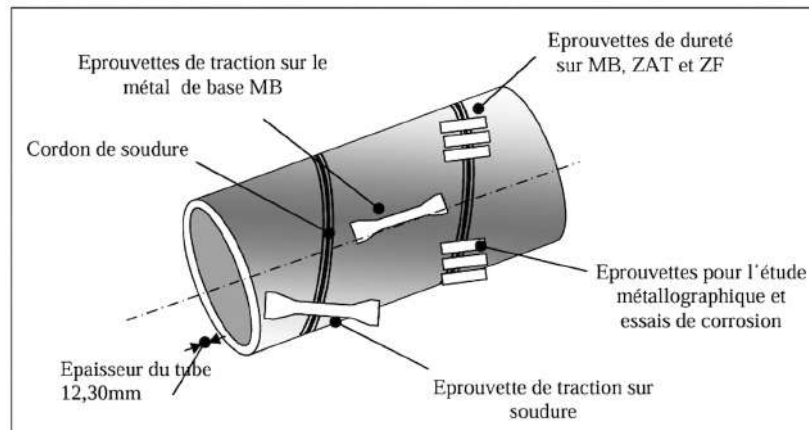


FIGURE 2.23 – Schéma de prélèvement des échantillons pour les essais destructifs [23]

5.2. Essai de traction

L'essai le plus couramment employé en mécanique est l'essai de traction. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à deux efforts F de tension de sens opposés et de même valeurs absolues. La ligne d'action coïncide avec l'axe de symétrie ou de rotation de l'éprouvette. On mesure immédiatement l'allongement Δl qui lui correspond [24].

5.2.1. Principe de l'essai

Des éprouvettes du matériau, en forme de barreaux cylindriques ou prismatiques, possèdent une partie centrale calibrée avec une section constante S_0 et une longueur L_0 . Cette partie est reliée à chaque extrémité à deux têtes de section plus large, et l'ensemble est fixé dans une machine de traction. L'essai se fait à température ambiante, entre 10°C et 35°C. Il est aussi possible de réaliser ces tests à différentes températures, allant de températures cryogéniques jusqu'à des températures élevées, mais inférieures à la moitié de la température de fusion, afin d'observer comment le matériau réagit selon la température [24].

5.2.2. Eprouvette

La forme et la taille des éprouvettes dépendent de celles des produits métalliques dont on veut mesurer les propriétés mécaniques. En général, on fabrique l'éprouvette en usinant un morceau prélevé sur un produit ou une pièce moulée. Cependant, pour les produits avec une section constante (comme les profilés, barres, fils, etc.) ou pour les éprouvettes brutes de fonderie (comme les fontes ou les alliages non ferreux), on peut faire les essais sans les usiner.

Quand les éprouvettes sont usinées, il faut ajouter une transition arrondie entre les parties de fixation et la partie étroite quand leurs dimensions diffèrent. Cette transition

peut être assez grande, il est donc conseillé qu'elle soit précisée dans la fiche technique du matériau. Les parties de fixation peuvent avoir différentes formes, selon l'adaptation requise pour le dispositif de la machine.

Pour les éprouvettes non usinées, comme celles venant directement de la fonderie, il faut aussi une transition entre la fixation et la partie étroite. Là encore, la taille de cette transition est importante et il vaut mieux qu'elle figure dans la norme du produit [24]. On note :

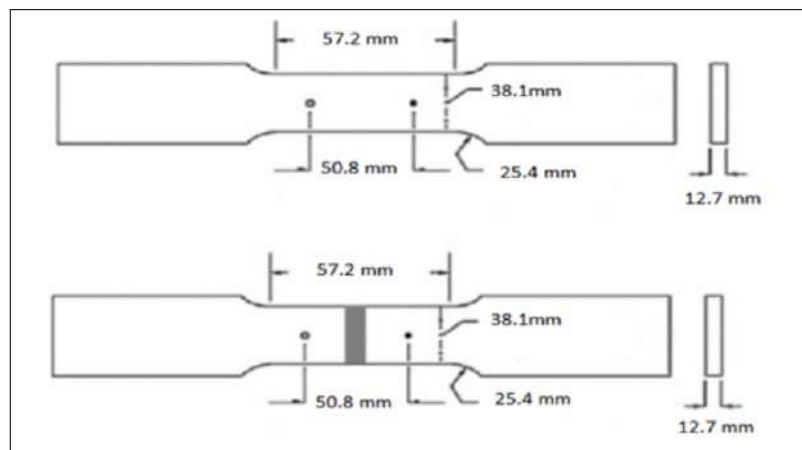


FIGURE 2.24 – Dimension de l'éprouvette [36]

Pour l'essai de traction, les paramètres obtenus reflètent les propriétés de l'acier dans la même direction que celle de l'essai. Ces valeurs varient donc selon l'orientation de l'éprouvette par rapport à d'éventuelles directions où l'acier présente une anisotropie [15].

5.2.3. Exécution de l'essai

Une machine de traction se compose d'un cadre rigide avec une traverse fixe où l'on attache une extrémité de l'éprouvette. L'autre extrémité est fixée à une traverse qui peut se déplacer. Ce déplacement est contrôlé soit par un système hydraulique, soit par des vis sans fin. La force exercée sur l'éprouvette est mesurée avec un dynamomètre, tandis que son allongement est relevé par un extensomètre. Cela permet ensuite d'obtenir la courbe brute de traction, $F = F(\Delta l)$, qui décrit les caractéristiques de l'échantillon et sa forme [24].



FIGURE 2.25 – Machines d'essais de traction [15]

5.3. Essai de résilience

L'essai de résilience vient en plus de l'essai de traction. Il consiste à casser d'un seul coup une éprouvette avec une entaille, pour mesurer l'énergie qu'il faut pour la casser. Ce test se fait à l'aide d'un mouton-pendule [26].

5.3.1. L'éprouvette de résilience

L'essai a été réalisé sur deux types d'éprouvettes aux dimensions normalisées. La figure ci-dessous montre les dimensions et les types des éprouvettes [26].

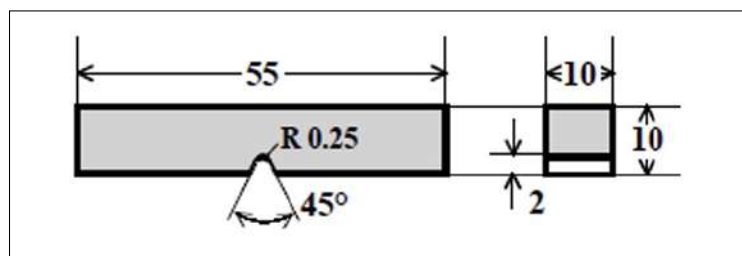


FIGURE 2.26 – Les types d'éprouvette de résilience [26]



FIGURE 2.27 – La machine de Charpy et un cryostat

5.3.2. L'essai Charpy

L'essai Charpy a pour objet de déterminer la résistance aux chocs des matériaux. On mesure ce qu'on appelle leur résilience, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour briser, au moyen d'un mouton pendule, une éprouvette de référence dont la section est égale à 1 cm^2 . Le barreau utilisé comme éprouvette de référence a une longueur de 55 mm, une section carrée de dix par dix millimètres et une entaille de profondeur 5 mm. L'entaille peut être de forme diverse : en U ou, le plus souvent, en V.

On mesure l'énergie dépensée pour rompre le barreau par la différence d'énergie potentielle entre la hauteur de chute du mouton et celle à laquelle il remonte après avoir cassé le barreau. S'il était tout à fait fragile, le mouton remonterait à la même hauteur que celle d'où il est tombé ; s'il était au contraire extrêmement tenace, il ne serait pas rompu et le pendule ne remonterait point. L'énergie de rupture ainsi déterminée est appelée résilience. Plus elle est haute, plus le matériau est tenace [25].

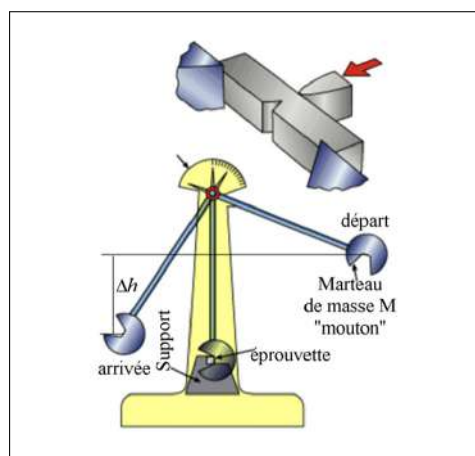


FIGURE 2.28 – Principe de l'essai de charpy [25]

5.4. L'essai de dureté

Les essais de dureté consistent à mesurer la pression moyenne exercée entre deux matériaux quand un indenteur (qui peut être conique, pyramidal ou sphérique) s'enfonce sur une surface plane. On évalue la dureté soit après avoir retiré l'indenteur, en mesurant la taille de l'empreinte laissée, soit pendant l'essai, en analysant la courbe qui relie la profondeur de l'indentation à la force appliquée [24].

5.4.1. Principe de l'essai

Cela consiste à enfoncer un objet pointu dans le métal testé. On applique une force constante, puis on mesure la taille de la marque laissée. Plus la marque est grande, plus le métal est dur. La dureté H se calcule en faisant le rapport entre la force appliquée et la surface de cette empreinte [24].

Dureté : La dureté d'un matériau est la résistance qu'une surface d'échantillon oppose à la pénétration d'un corps plus dur, par exemple la bille ou la pointe d'un duromètre [27].

Micro-dureté : Les essais de micro-dureté sont effectués à des charges plus faibles. Le pénétrateur est généralement du type Vickers. On mesure la diagonale de l'empreinte au moyen d'un microscope optique. Pour obtenir des résultats satisfaisants, il faut préciser la vitesse de mise en charge, la charge maximum appliquée et la préparation de l'échantillon testé (polissage, traitement thermique). L'épaisseur de l'échantillon doit être égale à 1,5 fois la diagonale « d » de l'empreinte [27].

5.4.2. Essai de dureté Vickers (HV10)

L'exécution des mesures sur chaque profil débute du métal de base, en passant par la ZAT puis le centre du cordon de soudure (la zone fondue) et le métal de base de l'autre côté (**Figure 2.30**). Le pénétrateur a la forme d'une pyramide droite à base carrée et la dureté est mesurée par la mesure des deux diagonales de l'empreinte liées à la charge appliquée par la relation indiquée sur la **Figure 2.31** [27].

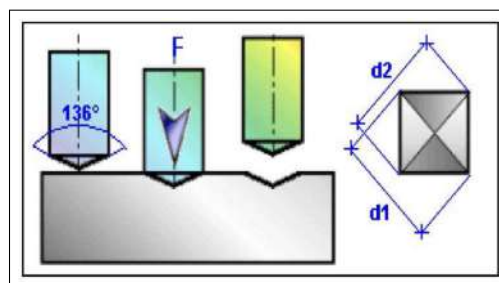


FIGURE 2.29 – Principe de l'essai de Vickers [25]

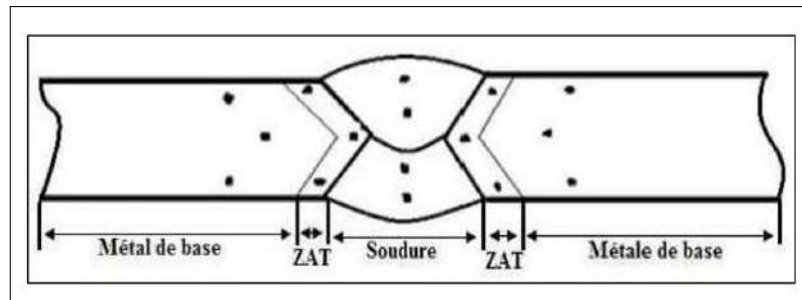


FIGURE 2.30 – Éprouvette de l'essai de dureté selon la norme API [25]



FIGURE 2.31 – Machine de dureté

6. Revêtement extérieur et intérieur

- **Revêtement intérieur :**

Il est fabriqué en résine époxy pour les tubes utilisés dans le transport et la distribution du gaz sec, ainsi que pour le transport du gaz humide, de l'eau potable brute et de l'eau industrielle. Le revêtement présente un aspect brillant et lisse conforme aux exigences de la norme API 5L [28].

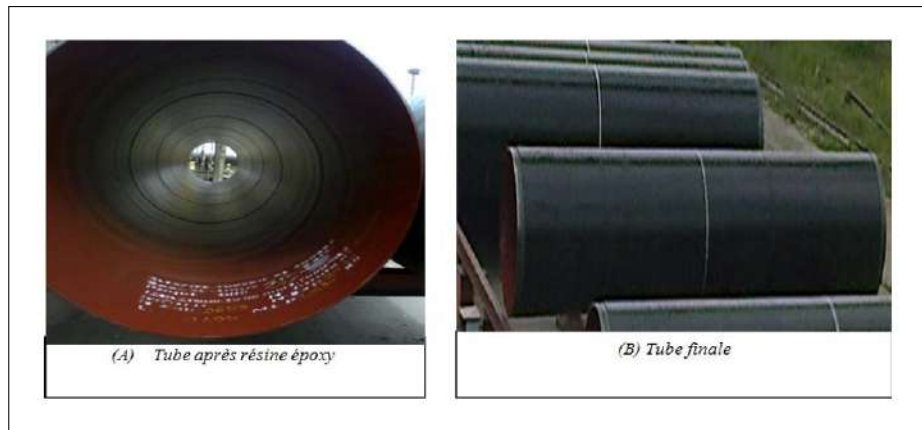


FIGURE 2.32 – Tube revêtu [28]

- **Revêtement extérieur :**

Les domaines d'utilisation sont principalement les canalisations enterrées ou posées en surface, et les canalisations émergées en eau douce ou salée. Le revêtement est formé de :

- Une couche de résine époxydique appliquée par pulvérisation électrostatique, d'une épaisseur de 50 à 80 microns.
- Une deuxième couche en copolymère est destinée à assurer l'adhérence polyéthylène.
- Une feuille de polyéthylène extrudé.

Les avantages du revêtement extérieur en polyéthylène résident dans sa grande inertie chimique, son excellente adhérence sur l'acier, et le fait qu'il confère au réseau une résistance fiable face aux sols agressifs et aux courants vagabonds [28].

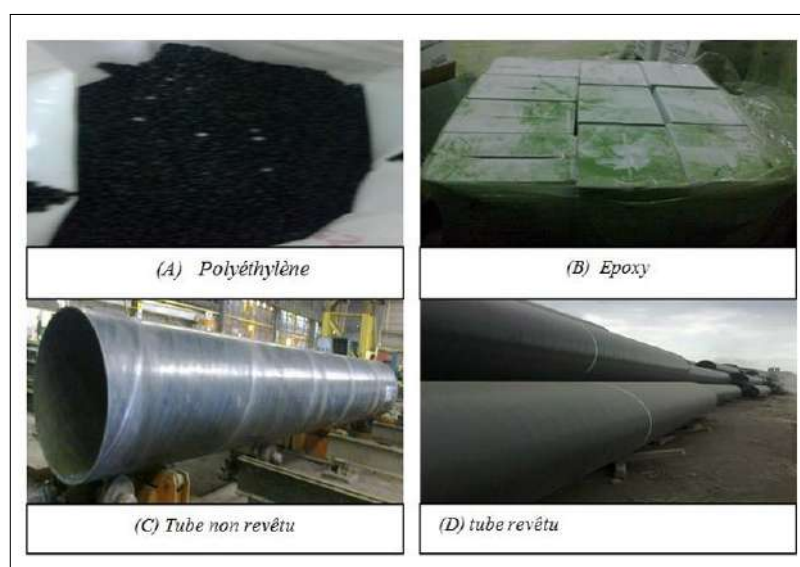


FIGURE 2.33 – Revêtement extérieur [28]

7. L'état des surfaces

7.1. Généralités

Par définition, la surface d'un corps est l'endroit où se trouvent les points qui séparent ce corps du milieu ambiant. Elle répond donc à une discontinuité dans l'agencement périodique des atomes de celui-ci.

L'état de surface se définit par :

- l'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles),
- l'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale).

En fait, le terme surface signifie une couche dont l'épaisseur varie entre 10^{-2} et 10^{-6} mm. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être couverte de films contaminants (gaz adsorbés, produits organiques), d'oxydes et, dans le cas des métaux, peut être écrouée [29].

Ces écrans vont changer la tribologie des corps en contact (**Figure 2.34**).

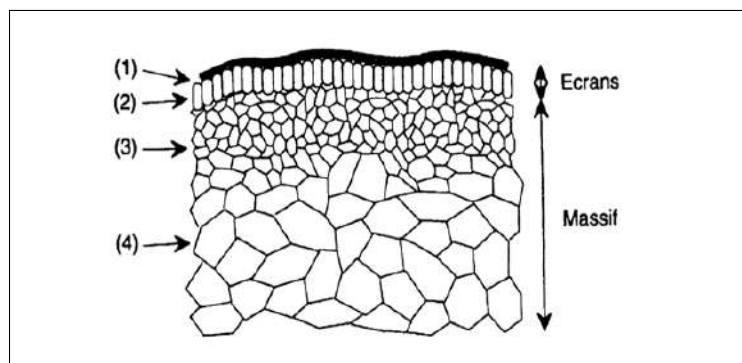


FIGURE 2.34 – Représentation schématique en coupe d'une surface [29]

La surface est donc la partie la plus perturbée d'une pièce. La zone (1) correspond à un film de 0,3 à 3 nm composé de couches adsorbées. La zone (2) est une couche d'oxydes mesurant entre 1 et 10 μm . La zone (3) représente une couche mécaniquement perturbée, entre 1 et 50 μm , avec une structure écrouie ou une structure de diffusion. Enfin, la zone (4), à partir de 100 μm , correspond au matériau massif [29].

7.2. Défauts géométriques

Les surfaces présentent des défauts de la surface usinée et des défauts géométriques de différents ordres : Ordres macroscopiques liés à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice (écart de forme du 1er et 2nd ordre), ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de

coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenaillage, aux vibrations de la machine ou encore aux piqûres de corrosion (rugosité, écarts de forme de 3ième et 4ième ordre) [29], (**Figure 2.33**).

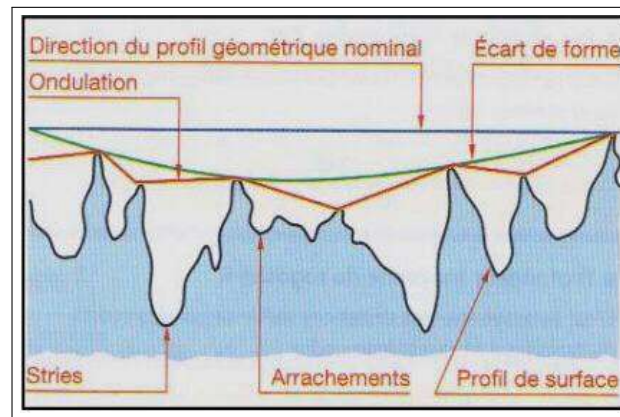


FIGURE 2.35 – Défauts géométriques de différents ordres [29]

7.3. Rugosité

La rugosité correspond aux motifs géométriques simples qui se répètent, comme les traces laissées par un outil lors de l'usinage ou les impacts de projectiles sur une surface grenaillée. Elle sert donc souvent à évaluer la qualité d'une surface. On peut voir une surface rugueuse comme un phénomène un peu aléatoire. C'est pour cela qu'on utilise souvent une approche statistique pour la comprendre et la modéliser. Dans les études, on trouve deux types de paramètres : certains mesurent des valeurs moyennes sur le profil, comme la hauteur moyenne des pics, d'autres décrivent plutôt la répartition statistique de ces hauteurs [29].

7.4. Paramètres de rugosité

Les paramètres de rugosité peuvent être exprimés de différentes façons selon les normes utilisées. Il est important de bien définir les conditions de mesure du profil, comme l'endroit choisi ou l'orientation du plan de mesure, pour obtenir des valeurs qui reflètent correctement les écarts géométriques à analyser. En pratique, cela amène souvent à faire plusieurs mesures. Parmi les paramètres de rugosité ou d'état de surface utilisés en usinage, les plus courants sont R_z et R_a . On utilise souvent R_a parce qu'il offre une meilleure précision, ce qui le rend préféré dans les travaux de laboratoire. Ce paramètre R_a correspond à la moyenne arithmétique des distances absolues du profil de rugosité R mesurée par rapport à la ligne médiane du profil, sur la longueur d'évaluation l_m (**Figure 2.36**) [29].

La rugosité a tendance à concentrer les contraintes et à provoquer l'apparition de petites fissures de fatigue, surtout quand les charges varient. De plus, la décarbonisation et d'autres défauts à la surface du métal font baisser sa résistance à la fatigue.

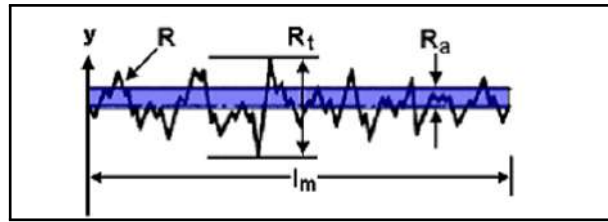


FIGURE 2.36 – Rugosité moyenne arithmétique [29]

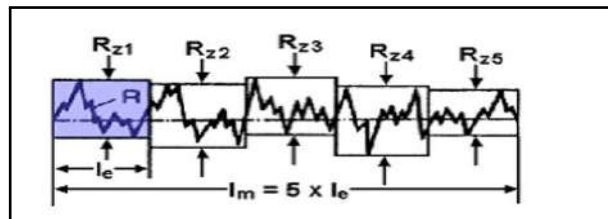


FIGURE 2.37 – Rugosité totale moyenne [29]

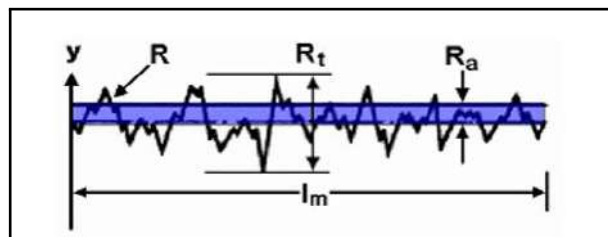


FIGURE 2.38 – Rugosité totale maximale [29]

7.4.1. Mesure de la rugosité

Quand on ne peut pas vraiment sentir ou voir la différence de rugosité entre deux surfaces, on utilise un rugosimètre. Cet appareil mesure avec précision plusieurs paramètres de rugosité comme le R_a ou le R_z . Dans l'industrie, cet outil sert dans plusieurs domaines :

- **En mécanique** : par exemple, affiner la rugosité peut aider à mieux fixer des pièces, surtout quand la friction est importante, comme avec les cônes morses.
- **En contrôle qualité** : le rugosimètre sert à vérifier la finition à la fin d'une chaîne de production, ce qui permet de détecter et corriger des défauts qui auraient pu apparaître lors de l'usinage.
- **Dans la recherche** : mesurer la rugosité aide à juger l'efficacité d'un nouveau revêtement ou d'un traitement de surface [29].

Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière la complexité du processus de fabrication des tubes soudés en spirale et l'importance capitale du contrôle qualité à chaque étape de production. Il a été établi que les défauts de surface — qu'ils soient d'origine mécanique ou liés à la corrosion — constituent des facteurs déterminants dans l'amorçage de la rupture des canalisations. Les techniques de contrôle non destructif, telles que les ultrasons et la radiographie, jouent un rôle essentiel dans la détection précoce de ces défauts. Cette analyse souligne l'importance d'améliorer l'état de surface des tubes afin de prolonger leur durée de vie en service, ce qui justifie pleinement l'intérêt du traitement mécanique de surface par brunissage, qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Traitement Mécanique De Surface

Introduction

Les traitements mécaniques de surface (grenaillage, grenaillage de précontrainte, brunissage, galetage, martelage ou choc laser) améliorent les performances des matériaux par durcissement superficiel. Leur principe repose sur l'application d'une pression locale induisant une déformation plastique hétérogène en profondeur. Ce processus génère des contraintes résiduelles de compression, un écrouissage superficiel, un raffinement grain ou des transformations de phase. Ces modifications microstructurales et mécaniques s'avèrent particulièrement favorables à l'amélioration de la résistance à la fatigue, à la corrosion, à l'usure et au frottement [30].

Ce troisième chapitre est consacré à la présentation des principaux traitements mécaniques de surface, avec un focus particulier sur le brunissage à bille. Son principe physique, ses paramètres opératoires, la conception du dispositif utilisé, ainsi que ses avantages et inconvénients seront développés en détail, afin de mieux appréhender son effet sur le matériau étudié.

1. Principe du traitement mécanique de surface

Le traitement de finition par pression est un traitement à froid sans enlèvement de matière. Son principe repose sur les propriétés des matériaux et leur capacité à la déformation élasto-plastique de la couche superficielle. Sous la pression de l'outil (bille, galet, pointe sphérique) en métaux durs, alliages durs ou diamant, les microreliefs de départ de la pièce se déforment plastiquement, se compriment en un nouveau microrelief plus régulier (**Figure 3.1**) [31].

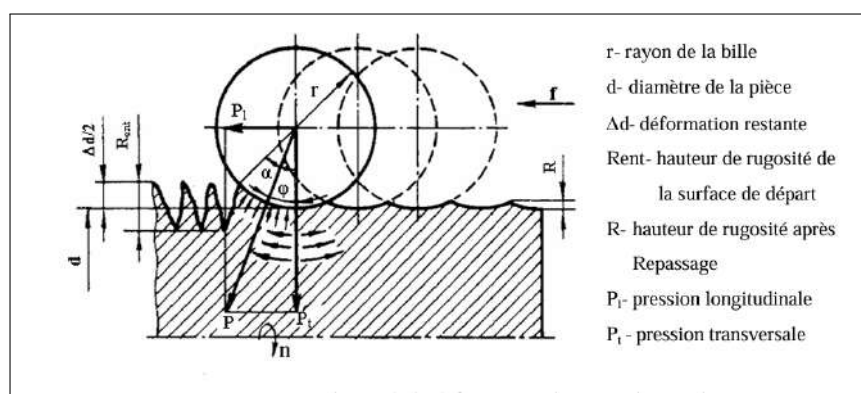


FIGURE 3.1 – Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille [31]

2. Types de traitement mécanique de surface

Les traitements les plus courants sont le brunissage, le galetage et le martelage. Le principe de base consiste à appliquer une pression sur la surface du matériau pour provoquer une déformation plastique. Cette pression peut venir d'un outil de forme, comme dans le cas du galetage, ou d'une onde de choc, comme pour le traitement par choc laser. La déformation plastique ne se répartit pas de manière uniforme en profondeur à partir de la surface traitée. Ce genre de traitement crée des contraintes résiduelles en compression, ce qui améliore souvent la résistance à la fatigue et à la corrosion [34].

2.1 Brunissage

• Définition et principe

Le brunissage est essentiel dans un procédé de formage à froid, dans lequel le métal près d'une surface usinée est déplacé des protrusions pour remplir les dépressions. Beside produisant une bonne finition de surface, le procédé de brunissage présente des avantages supplémentaires par rapport à d'autres procédés d'usinage, tels que sécuriser une dureté accrue, une résistance à la corrosion et une durée de vie en fatigue en résultat de la production de contrainte résiduelle de compression [32].

Le principe du procédé de brunissage, illustré à la **Figure 3.2**, repose sur un outil d'indentation (bille ou galet) roulant contre la surface de la pièce. Un écoulement plastique des aspérités initiales se produit lorsque la limite d'élasticité du matériau de la pièce est dépassée. De cette manière, les aspérités sont aplaties. Des contraintes de compression sont également induites dans la couche de surface, apportant plusieurs améliorations aux propriétés mécaniques. Le brunissage peut améliorer à la fois la résistance de surface et la rugosité. L'augmentation de la résistance de surface sert principalement à améliorer la résistance à la fatigue sous charges dynamiques [33].

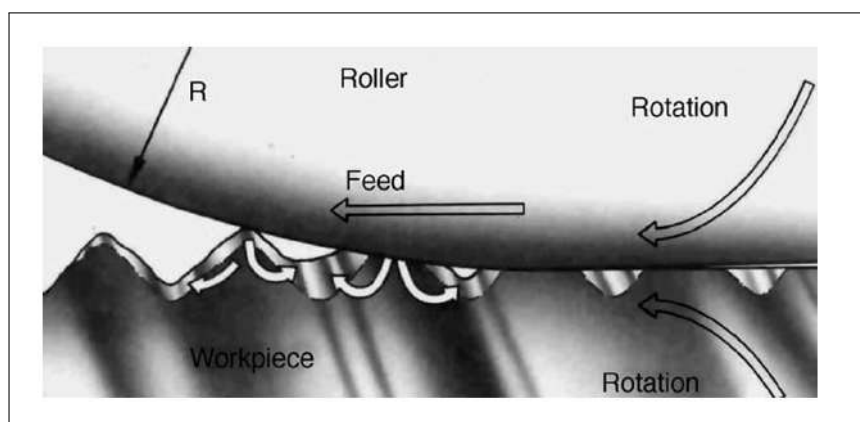


FIGURE 3.2 – Schéma de principe du brunissage [33]

2.2 Galetage

Le galetage, aussi appelé brunissage au galet, est une méthode de traitement mécanique des surfaces qui ressemble beaucoup au brunissage. Elle provoque une déformation plastique en surface, à froid. Contrairement au brunissoir, l'outil utilisé pour le galetage est constitué de galets qui tournent par rapport au porte-outil (voir **Figure 3.3**) [34].

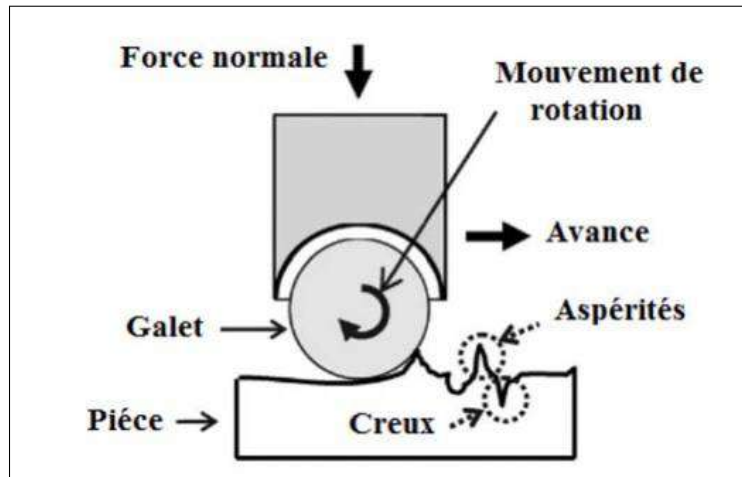


FIGURE 3.3 – Schéma décrivant le procédé de galetage [34]

Les galets peuvent être de formes cylindriques (**Figure 3.4**) ou coniques, mais sont le plus souvent sphériques sous forme de billes [34].



FIGURE 3.4 – Vue d'un dispositif de galetage à galets cylindrique [34]

3. Brunissage à la bille

Le brunissage à bille consiste à aplanir les irrégularités de surface générées par l'usinage conventionnel via un processus de déformation plastique à froid, dans lequel aucune matière n'est enlevée. Le processus consiste à appliquer une force externe sur une bille polie, qui passe sur la surface d'une pièce usinée plane ou cylindrique (voir **Figure 3.5**) [35].

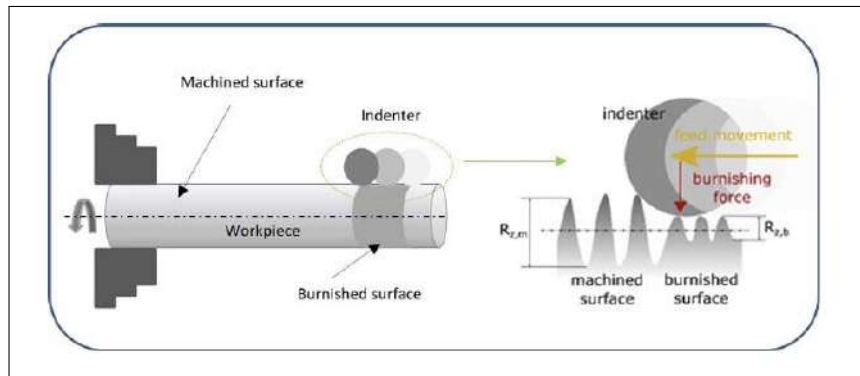


FIGURE 3.5 – Diagramme de l'affectation du brunissage sur la pièce [35]

Au cours du brunissage, des contraintes résiduelles considérables sont introduites dans la surface de la pièce, augmentant ainsi la résistance à la fatigue et à l'usure de la couche superficielle. Ce processus aplatit et durcit la surface, aboutissant à un état de surface qui durera plus longtemps qu'un fini issu d'un usinage pur [35].

• Principe de brunissage à bille

Le brunissage est une technique de déformation à froid réalisée par écrasement des surfaces des matériaux sans enlèvement de copeaux [37]. Cette technique crée des contraintes de compression résiduelles à la surface du matériau et affecte la microstructure.

Cette transformation de la surface s'explique par une approche plus fondamentale du processus. Dans une perspective plus approfondie, il consiste en une déformation plastique graduelle qui commence par une déformation élastique sur la zone sollicitée jusqu'à la zone de finition, avec un rapport de contact maximal entre l'éprouvette et l'indenteur dans la direction de brunissage définie. La surface déformée résultante reste géométriquement constante à l'échelle macroscopique, de sorte que les dimensions ne sont pas modifiées, ce qui la rend adaptée au processus de finition sur des pièces usinées finales. Cependant, à l'échelle microscopique, les changements topologiques dus à la déformation plastique sont inférieurs à $10\text{ }\mu\text{m}$, mais ont un impact énorme sur les paramètres de rugosité et définissent la qualité de l'état de surface. Dans l'industrie, la rugosité est un facteur très important en termes de résistance à la fatigue ou de réduction de la friction avec d'autres pièces ; les aspérités possibles de la surface pourraient entraîner des performances non optimales, ce qui n'est évidemment pas souhaité. Le brunissage à bille est également désigné sous les

termes de Low Plasticity Burnishing (LPB), Deep Rolling (DP) ou Surface Severe Plastic Deformation (SSPD). Normalement, le LPB est couramment utilisé lorsque l'objectif est l'étude de l'évolution de la rugosité, le DP est utilisé lorsque l'étude se réfère à l'induction de contraintes résiduelles de compression, et le SSPD est récemment utilisé pour les études de modélisation analytique. Cependant, la dénomination la plus courante est le brunissage, avec ses propres variations selon les caractéristiques de l'outil [35].



FIGURE 3.6 – Photo montage de l'outil de brunissage sur la fraiseuse a) fraiseuse verticale, b) photographie du dispositif [36]

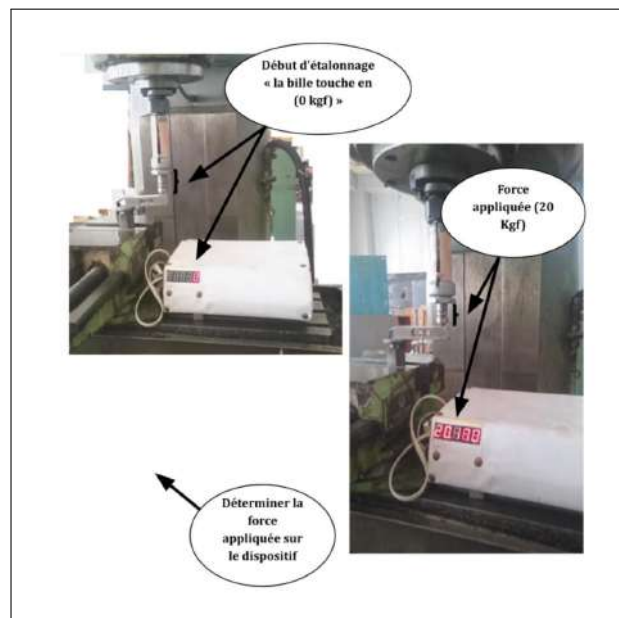


FIGURE 3.7 – Étalonnage de dispositif de brunissage [36]

4. Conception et fabrication du dispositif de traitement mécanique de surface

La majorité des dispositifs sont destinés à être monté sur tour. Pour les besoins de notre thèse et en vue de traiter les pièces prismatiques, le travail sur une fraiseuse s'impose. Ainsi nous avons conçu un dispositif spécialement à cet effet.

L'étude repose dans un premier temps sur la forme du corps qui doit s'ajuster dans la broche cylindrique de la fraiseuse verticale. A cet effet le corps du dispositif est emmanché dans une pince logée dans un cône morse et serré par un écrou. Le cône morse s'ajuster directement dans la broche de la machine-outil [36].

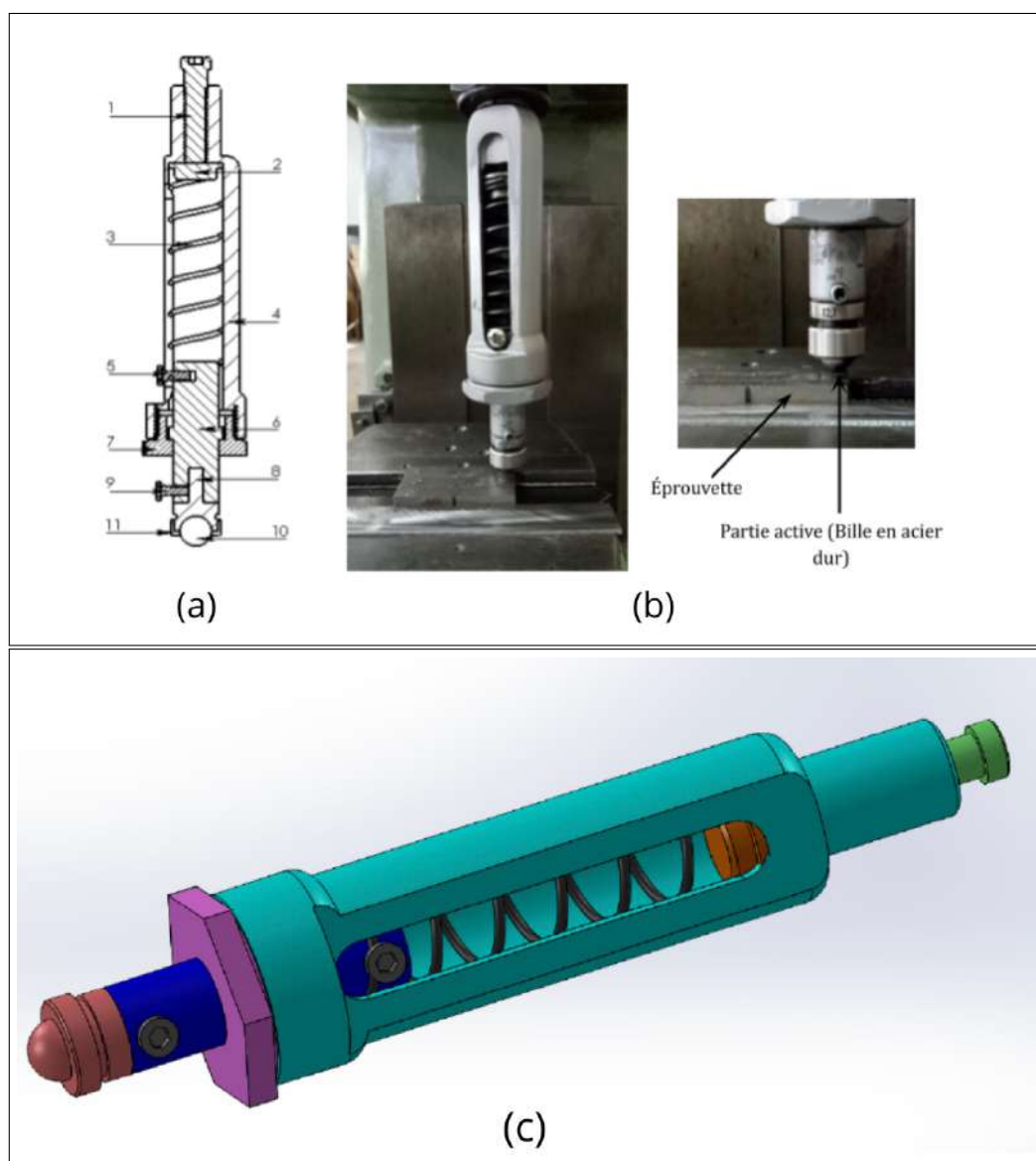


FIGURE 3.8 – Dispositif de traitement mécanique de surface a) Schéma de principe, b) photographie du dispositif, c) photo de mise en œuvre [36]

La partie active est une bille (10) en acier dur d'une dureté HRC65 qui vient se loger librement dans la cavité sphérique avec une poignée de la bille (8) lui-même position et fixe rigidement dans le trou de (6) au moyen d'une vis de serrage (7). La bille flette dans une bague fileté à cavité sphérique serrée modérément avec une poignée de la bille (8). Cela permet de supporter la bille lors du traitement mécanique et lui assurer une certaine liberté du mouvement dans son travail pour atténuer (voir éliminer) son frottement sur la pièce à traiter.

Les sons ensemble actif (6, 8, 9, 10 et 11) du dispositif ajusté librement à l'intérieure du corps peut aussi se déplacer longitudinalement dans celui-ci. La limite de fin de course qui dépend de la charge appliquée est assurée par un épaulement aménagé dans (6) qui prend appui sur la base l'écrou (7) lui-même fileté dans le corps (4). De cette façon la bille différente libre dans son logement, peut se déplacer en hanteur avec ses sons ensemble à l'intérieur du corps de dispositif (4) pour pouvoir assurer la déformation plastique superficielle DPS.

La profondeur de pénétration est mesurée indirectement par le taux de compression d'un ressort (3) d'une rigidité considérable qui s'intercale entre le (6) et le (2). L'application d'une charge P sur la tête de la tige (2) assure la compression du ressort qui fait déplacer dans la matière. Le déplacement étant proportionnelle à la charge P , la limite de déplacement correspondant à une charge donnée est repérée au moyen d'un indicateur sous forme de vis fixe (5) à (6). Cette vis coulisse à travers une fenêtre usinée dans le corps (4) sur laquelle une échelle de graduation a été marquée.

Auparavant une telle conception permet aisément d'étalonner le dispositif pour défirer charges appliquées sous forme de poids (masse) en repérant la position de vis (5). Une fois le dispositif est monté sur la fraiseuse, la charge appliquée est assurée par le mouvement de pénétration de la table de la machine-outil sur laquelle est fixée la pièce à traiter.

La configuration (forme et dimensions) de l'ensemble du dispositif a été étudié de manière à lui assurer d'une part le rôle fonctionnel espéré c'est-à-dire la déplacement plastique des couches superficiels et d'autre part un concept de design et d'ergonomie pour travailler avec le maximum de sécurité. Une tolérance de l'ordre de plus au moins 0,5mm et une rugosité d'environ $R_a = 3,2\text{mm}$ ont été imposée lors de la conception, la gamme de fabrication de l'eus des pièces de la nomenclature du dispositif a été étudiée selon le procédé d'obtention unitaire des cotes où toutes les spécifications de forme, de positions des surfaces, de tolérance dimensionnelles et d'état de surface ont été respectées à l'aide des passes d'essai et de mesure sur un système Machine-outil Dispositif [36].

5. Intérêt et paramètres du brunissage

L'impératif de disposer de surfaces d'une qualité exemplaire, associé à la nécessité de rentabilité, nécessite la mise en œuvre du brunissage, qui permet d'obtenir des caractéristiques de surface et des tolérances dimensionnelles similaires à celles dérivées des processus d'usinage de finition tels que le tournage dur ou le meulage. En effet, il a été établi que dans le domaine de l'usinage conventionnel, les dépenses associées à la fabrication augmentent considérablement à mesure que la rugosité de la surface diminue. En outre, il est possible de réaliser des économies non seulement sur les dépenses de fabrication en réduisant la durée du processus de brunissage, mais également en diminuant les coûts liés à l'outillage et aux étapes préparatoires des pièces [31]. Le brunissage est de plus en plus reconnu comme une procédure de finition avantageuse et a le potentiel de supplanter d'autres techniques traditionnelles utilisées dans le traitement des matériaux.

En conclusion, le traitement de brunissage représente une alternative viable à de nombreux procédés de fabrication impliquant l'élimination des copeaux. Les paramètres qui influencent la qualité de la finition de surface sont divers ; nous dépendons souvent de facteurs tels que la vitesse, la vitesse d'avance ou la force appliquée [32, 33], tandis que parfois, des variables supplémentaires sont incorporées, notamment le nombre de passes, le rayon de l'outil, la profondeur de pénétration ou le degré d'interférence [34, 35]. Les réponses obtenues dépendent principalement d'une interaction particulière des différents paramètres, qui sont pris en compte en fonction des outils utilisés, du matériau soumis au traitement, des conditions opérationnelles, ainsi que de l'état initial des couches de surface [29].

6. Avantages et inconvénients du brunissage

Chaque technique de fabrication a ses propres avantages et inconvénients, qui influencent son application dans les domaines industriels. Le brunissage a aussi des avantages et des inconvénients, qui sont discutés dans cette section.

A. Avantages du processus de Brunissage

- 1. Taille précise :** Les pièces peuvent être fabriquées par brunissage avec un contrôle précis des dimensions. Ainsi, des tolérances très serrées peuvent être obtenues [38].
- 2. Finition de surface superfine :** Finition des surfaces très lisses, jusqu'à $0,05 \mu\text{m Ra}$ est faisable avec le brunissage. La qualité de surface obtenue est comparable à toutes les autres méthodes classiques de finition comme le meulage, le grenaillage, etc [38].

3. Améliore les propriétés physiques : Le brunissage crée une surface solide, résistante à l'usure et à la rouille grâce au laminage à froid. Il génère aussi des tensions de compression qui prolongent la durée de vie en fatigue des pièces soumises à des charges répétées [38].

4. Plus économique : Le brunissage supprime le meulage et le rodage, qui sont des étapes chères et longues. Le brunissage peut être réalisé sur n'importe quel tour ou perceuse standard, ce qui évite un coût de départ. Une main-d'œuvre expérimentée n'est pas requise pour ce procédé. Tout ouvrier ayant de l'expérience avec un tour ou une perceuse peut effectuer le processus de brunissage [38].

5. Gain de temps : La pièce installée sur un tour, une fraiseuse ou une perceuse n'a pas besoin d'être repositionnée pour le brunissage. L'outil précédent peut être échangé contre un outil de brunissage et le processus peut être réalisé sur la même monture. Ainsi, la durée du cycle est diminuée, ce qui augmente le rendement [38].

6. Réglages réglables : La plupart des outils de brunissage que l'on trouve dans le commerce ont des réglages ajustables. Cela leur permet de s'adapter à différentes situations. De ce fait, quand il y a un changement dans la conception des composants, cela réduit le coût [38].

7. Pièces d'usure remplaçables : Les pièces d'usure comme les rouleaux, les billes et les rouleaux de guidage peuvent être facilement remplacées. Cela contribue à prolonger la durée de vie de l'outil. De plus, cela nécessite moins de coûts de maintenance. Le brunissage permet de traiter une grande variété de géométries de pièces. Les surfaces planes, les surfaces coniques, les surfaces cylindriques et les surfaces de forme libre peuvent toutes être traitées par brunissage [38].

B. Inconvénients du processus de brunissage

Voici les inconvénients de l'outil de brunissage :

1. Le coût initial de l'outil de brunissage est élevé [38].
2. Il est impossible d'appliquer le brunissage sur des pièces très petites [38].
3. Les composants dont les parois sont très fines et qui n'ont pas suffisamment de résistance ne peuvent pas être brunis, car le processus de brunissage applique des forces généralement importantes [38].
4. L'application de brunissage sur des formes et des contours complexes nécessite des outils spécialisés et des travailleurs très compétents. Lorsque la conception ou les formes des contours changent, il est nécessaire de concevoir et de produire un nouvel ensemble d'outils, ce qui augmente les dépenses et le temps nécessaire [38].

7. Applications Du Brunissage

- Divers éléments du système hydraulique
- Phoques
- Vannes
- Broche
- Fils accrochés à l'arbre
- Industrie des Moteurs et des Pompes
- Appareils Ménagers [38]

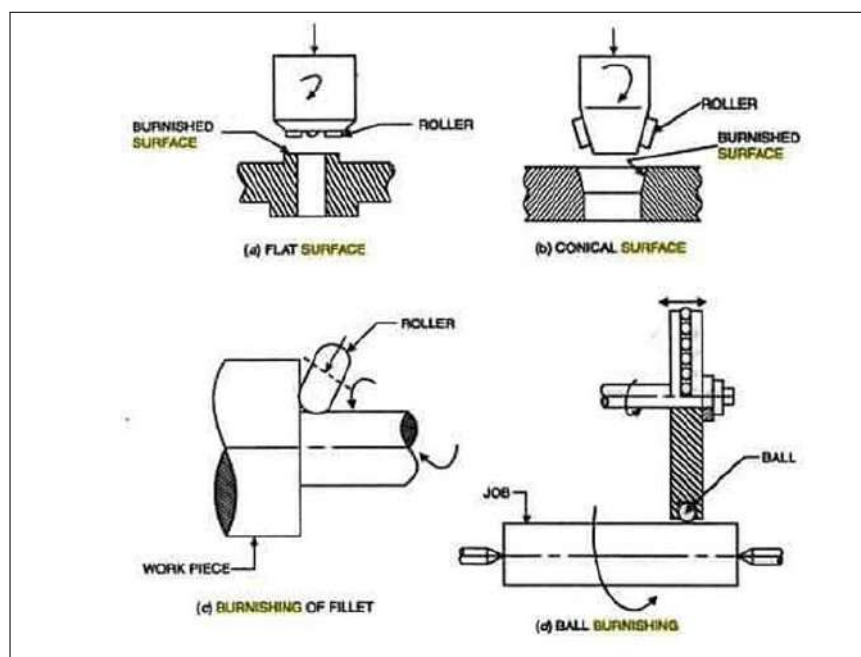


FIGURE 3.9 – Application de Brunissage [38]

Les surfaces planes, cylindriques ou coniques, tant intérieures qu'extérieures, sont polies à l'aide de rouleaux en acier trempé ou en carbure cémenté, ou de billes d'acier montées sur un support. Pour le polissage de filets et de rainures, on utilise des rouleaux arrondis à un rayon spécifique. Le polissage de trous est généralement effectué à l'aide d'outils à rouleaux multiples. Ces outils sont souvent utilisés sur des machines comme des perceuses à colonne, des tours à tourelle, des aléseuses horizontales, ainsi que sur des machines à unités construites et des tours automatiques [38].

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le brunissage à bille comme un traitement mécanique de surface simple, efficace et adaptable aux exigences industrielles. Son principe repose sur l'introduction de déformations plastiques superficielles contrôlées, qui génèrent des contraintes résiduelles de compression, améliorent la dureté superficielle et réduisent la rugosité de surface. Ces effets combinés contribuent à améliorer significativement la tenue en fatigue et la résistance à la corrosion des pièces traitées. Fort de ces données théoriques, le chapitre suivant sera consacré à la mise en œuvre expérimentale de ce traitement sur l'acier X70, afin de quantifier et d'analyser ses effets réels sur les propriétés mécaniques et l'état de surface de ce matériau.

Chapitre 4

Matériau et Techniques Expérimentales

Introduction

Après avoir établi les bases théoriques relatives aux aciers HLE, au procédé de fabrication des tubes soudés et au traitement mécanique de surface par brunissage, ce quatrième et dernier chapitre est dédié à la démarche expérimentale mise en œuvre dans le cadre de cette étude. L'objectif est d'évaluer quantitativement l'effet du brunissage à bille sur les propriétés mécaniques et l'état de surface de l'acier X70. Pour ce faire, le matériau utilisé sera d'abord caractérisé par sa composition chimique et sa microstructure, puis soumis à une série d'essais mécaniques — dureté, traction et résilience — avant et après traitement par brunissage. Les conditions de préparation des échantillons, les protocoles d'essais suivis ainsi que les résultats obtenus seront présentés et discutés de manière détaillée.

1. Matériau

Le matériau étudié est un tube en acier à haute limite élastique de nuance « API 5LX70 » destiné à la construction de pipelines, livré par l'unité ARCELOR MEETAL Annaba. Ce matériau est utilisé pour la fabrication des tuyaux qui serviront au transport des hydrocarbures. Il est arrivé sous la forme d'une longueur de tuyau de 1219,2 mm de diamètre, 12,7 mm d'épaisseur et 12 m de long.

L'appellation API 5L X70 indique :

API : American Petroleum Institute.

5 L : Spécification du pipeline.

X : Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance.

Le chiffre placé après le « X » indique la valeur de la limite d'élasticité minimale. Ainsi, l'acier X70 a une limite d'élasticité minimale de 70 ksi (485 MPa) [36].

2. Composition chimique

Une analyse chimique réalisée sur échantillon de tube soudé en spirale révèle la composition chimique suivante (**Table 4.1**).

TABLE 4.1 – Composition chimique de l'acier X70 [36]

Élément	C	Si	Mn	Al	Nb	V	Ti	Ni	Cu	Cr	Mo	Fe
(%)	0,076	0,37	1,54	0,04	0,05	0,084	0,005	0,028	0,014	0,027	0,004	97,7

3. Opération de Polissage

3.1. Pré-polissage

Utilisation de papiers abrasifs (Grinding papers) de granulométries croissantes (P320, P600, P800, et P1200). Cette étape permet d'éliminer les irrégularités de surface.



FIGURE 4.1 – Papiers abrasifs de différentes granulométries utilisés pour le pré-polissage.

3.2. Polissage de finition

Effectué sur une polisseuse mécanique, en utilisant une pâte diamantée (Diamond compound) pour obtenir un aspect « poli miroir », indispensable pour l'observation microscopique.



FIGURE 4.2 – Polisseuse mécanique de type BUEHLER METASERV utilisée pour la finition des échantillons.



FIGURE 4.3 – Composé de diamant (Diamond Compound) utilisé pour le polissage de finition.



FIGURE 4.4 – État final des échantillons (MB, ZAT, Soudure) après polissage.

4. Attaque chimique

Immersion dans une solution de Nital (Acide nitrique + Éthanol) afin de révéler la microstructure et de délimiter clairement les zones (MB, ZAT, Soudure).



FIGURE 4.5 – Attaque chimique superficielle de l’acier X70 par le réactif Nital (3%).

5. Essai de dureté

Afin d’évaluer les propriétés mécaniques locales de l’acier X70, notamment après l’opération de brunissage, nous avons réalisé une série d’essais de micro-dureté Vickers. Cette étude a été effectuée à l’aide d’un micro-duromètre numérique de haute précision de marque KB, disponible au sein du laboratoire des propriétés mécaniques du département de Génie Mécanique de l’Université Larbi Tébessi de Tébessa. Cet appareil est équipé d’une interface de commande numérique dotée d’un écran d’affichage et d’un clavier multifonction, permettant un réglage précis des paramètres d’essai, tels que la charge appliquée et le temps de maintien, ainsi qu’un contrôle rigoureux du processus de mesure. De plus, le duromètre est relié à un ordinateur externe qui assure le traitement et l’enregistrement des résultats en temps réel, comme illustré sur la **Figure 4.6**. Cette configuration garantit l’obtention de valeurs de micro-dureté fiables et directement exploitables, ce qui en fait l’une des méthodes les plus modernes et les plus précises adoptées dans les laboratoires de génie mécanique pour la caractérisation des matériaux et l’évaluation de l’effet des procédés de fabrication sur leurs propriétés mécaniques de surface.



FIGURE 4.6 – Machine de dureté universelle type KB 250 (Laboratoire de l'Université Larbi Tébéssi, Tébéssa)

Le processus expérimental commence par le positionnement de l'échantillon préalablement poli sur la platine de l'appareil. Une étape cruciale de mise au point optique est alors réalisée à l'aide d'un objectif de grossissement 10x, permettant de cibler avec précision les différentes zones de l'échantillon (Métal de Base, ZAT, ou Zone Soudée).

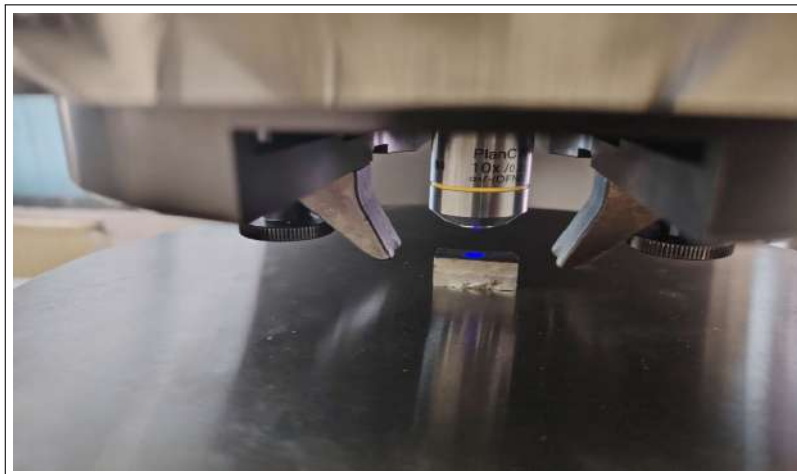


FIGURE 4.7 – Mise au point optique sur la surface

Une fois la zone identifiée, l'essai consiste à appliquer une charge de 10 kgf (HV10) pendant un temps maintenu, par l'intermédiaire d'un indenteur pyramidal en diamant qui pénètre la surface de l'acier.

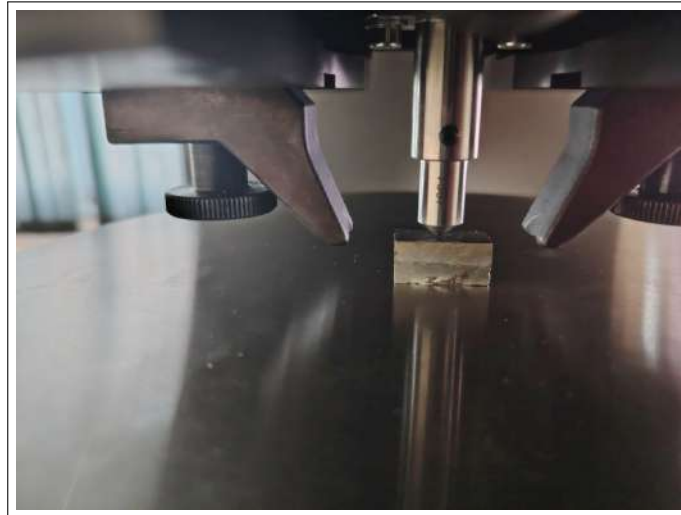
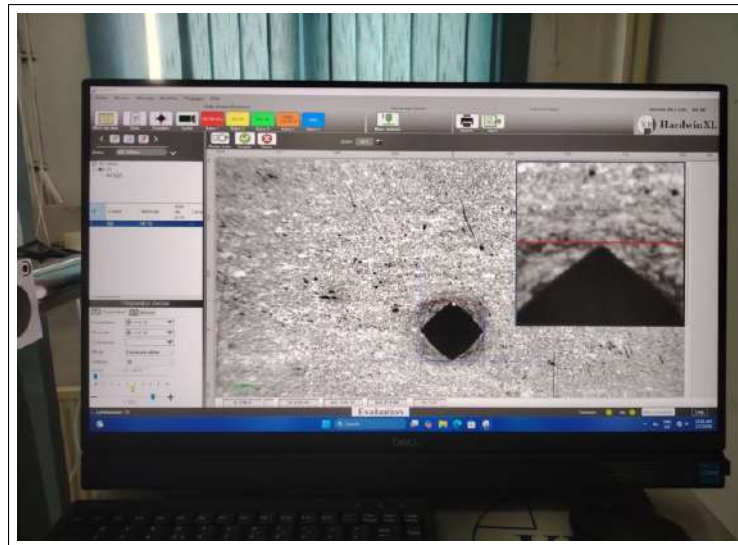


FIGURE 4.8 – Application de la charge (HV10) par l'indenteur pyramidal en diamant.

L'acquisition et l'analyse des résultats sont entièrement gérées par le logiciel **HardwinXL**, qui assure un contrôle total sur le processus de mesure. Ce système permet une visualisation directe et détaillée de l'empreinte laissée par le diamant sur l'écran de contrôle, facilitant ainsi la vérification de la qualité de l'indentation.

Comme illustré dans la **Figure 4.9**, le logiciel procède à la mesure automatique des deux diagonales de l'indentation (d_1 et d_2) grâce à des algorithmes de traitement d'image de haute précision. Cette analyse permet de calculer instantanément la valeur de dureté Vickers correspondante (ex : 249 HV10). En plus de la mesure en temps réel, l'interface affiche un tableau récapitulatif des données (Data Table) ainsi que les profils de distribution, garantissant ainsi une parfaite traçabilité et une analyse statistique fiable des propriétés mécaniques de l'acier X70.



(a) Visualisation microscopique de l'empreinte Vickers.



(b) Interface globale affichant les résultats et le tableau de bord.

FIGURE 4.9 – Interface de contrôle et analyse des indentations via HardwinXL.

5.1. Résultats et interprétations

5.1.1. Évaluation expérimentale de la micro-dureté Vickers 'Etat Usinage'

Afin de caractériser l'état mécanique initial du joint soudé avant tout traitement mécanique de surface, des essais de micro-dureté Vickers ont été systématiquement menés sur les trois zones constitutives de l'assemblage. **La Table 4.2** rassemble les valeurs quantitatives brutes obtenues ainsi que les moyennes calculées pour le Métal de Base (MB), la Zone de Fusion (ZF) et la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) à l'état d'usinage.

TABLE 4.2 – Valeurs de micro-dureté Vickers HV 10 à l'état d'usinage pour les différentes zones du joint soudé

N°	Etat Usinage		
	MB	ZF	ZAT
1	230	232	222
2	230	234	218
3	229	228	222
Valeur moyenne	229.66	231.33	220.66

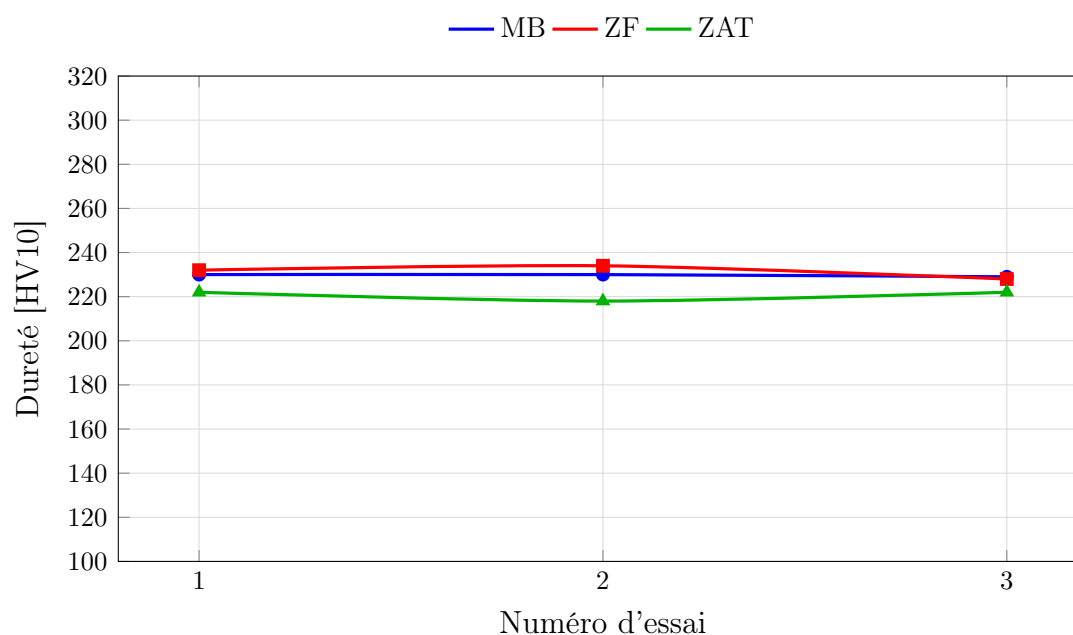


FIGURE 4.10 – Profil d'évolution de la micro-dureté Vickers HV 10 à l'état d'usinage (MB, ZF et ZAT)

La **figure 4.10** illustre la distribution spatiale de la micro-dureté Vickers sous une charge de HV10 à l'état initial d'usinage, englobant les trois entités métallurgiques distinctes du joint soudé en acier micro-allié API X70. Les valeurs quantitatives correspondantes, répertoriées dans la **Table 4.2**, révèlent des comportements mécaniques intimement liés aux cycles thermomécaniques induits.

- **Métal de Base (MB)** : Le MB affiche une linéarité géométrique quasi parfaite, oscillant de façon extrêmement serrée entre 229 HV et 230 HV, pour se stabiliser à une moyenne de 229,66 HV. Cette horizontalité absolue du profil confirme la parfaite homogénéité texturale de la matrice initiale. Elle correspond à la microstructure d'origine de l'acier laminé à chaud, constituée majoritairement d'une matrice ferrito-perlitique à grains fins, préservée de toute altération thermique ou mécanique parasite.

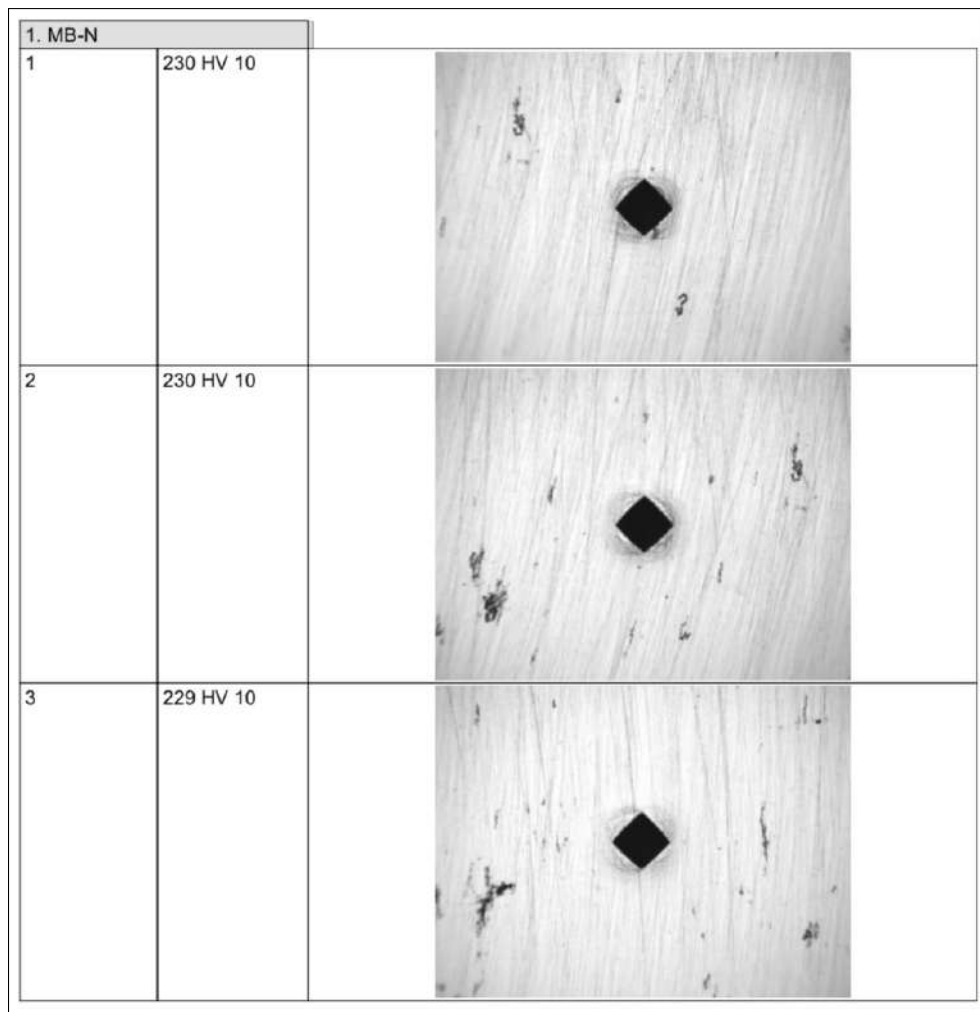


FIGURE 4.11 – Empreintes de micro-dureté Vickers HV10 obtenues sur le Métal de Base (MB) à l'état d'usinage

- **Zone de Fusion (ZF) :** Cette zone se caractérise par la cinétique de dureté la plus élevée du profil, culminant à une valeur moyenne de 231,33 HV. La relative homogénéité des mesures (dispersion restreinte entre 228 et 234 HV) traduit une stabilisation de la structure de solidification. Du point de vue métallurgique, cette supériorité mécanique discrète par rapport au métal de base résulte de l'effet combiné des éléments de transition de la nuance d'apport et du phénomène de durcissement par précipitation d'éléments micro-alliés (tels que le Nb, V et Ti), caractéristiques de l'acier X70, qui s'allient pour restreindre la restauration de la matrice lors de la solidification du bain de fusion.

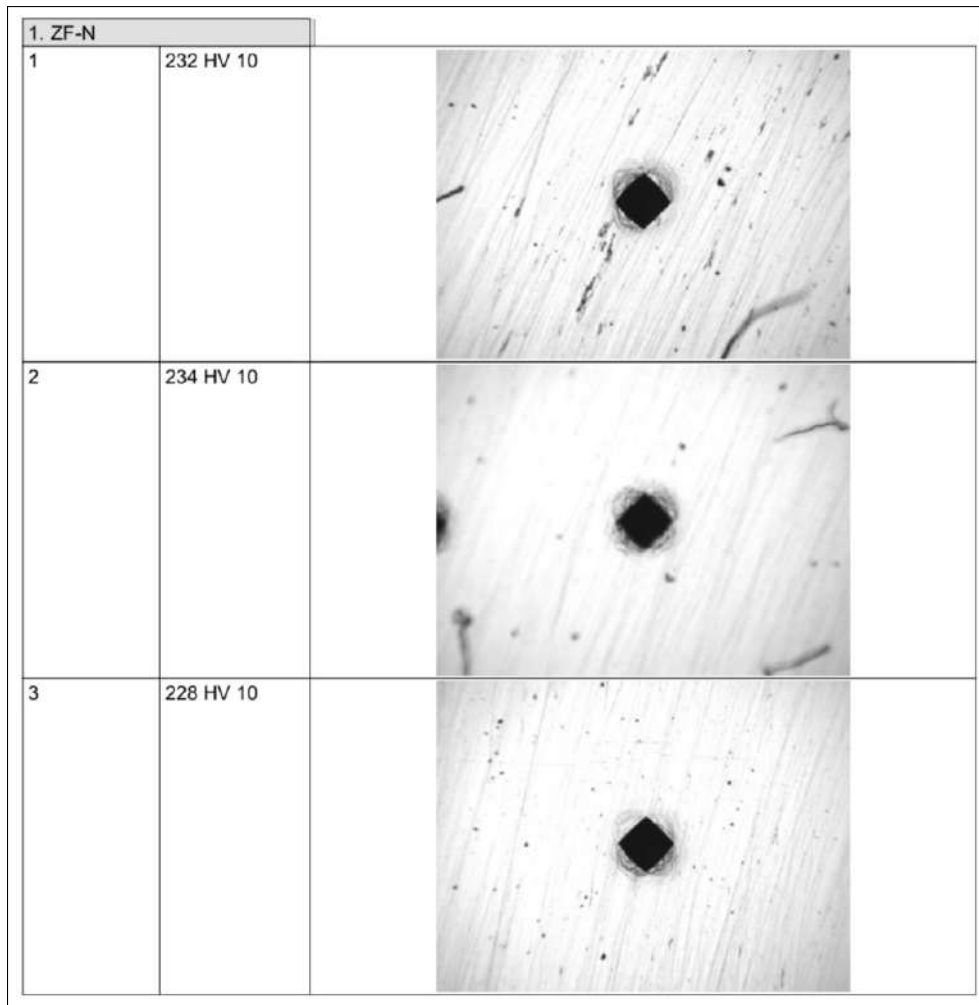


FIGURE 4.12 – Empreintes de micro-dureté Vickers HV10 obtenues sur la Zone de Fusion (ZF) à l'état d'usinage

- Zone Affectée Thermiquement (ZAT) :** À l'inverse des configurations de soudage classiques à refroidissement sévère, la ZAT enregistre ici un fléchissement systématique des valeurs, oscillant entre 218 HV et 222 HV, pour s'établir à une moyenne minimale de 220,66 HV. Ce phénomène macroscopique est le reflet direct d'une zone d'adoucissement thermique. Ce comportement s'explique par l'effet du gradient thermique du procédé de soudage spiral, ayant favorisé localement soit un grossissement partiel des grains ferritiques (ZATGG), soit un phénomène de coalescence des précipités carbonitrides secondaires, entraînant une chute locale de la densité des dislocations et, par conséquent, une diminution de la résistance à la pénétration plastique.

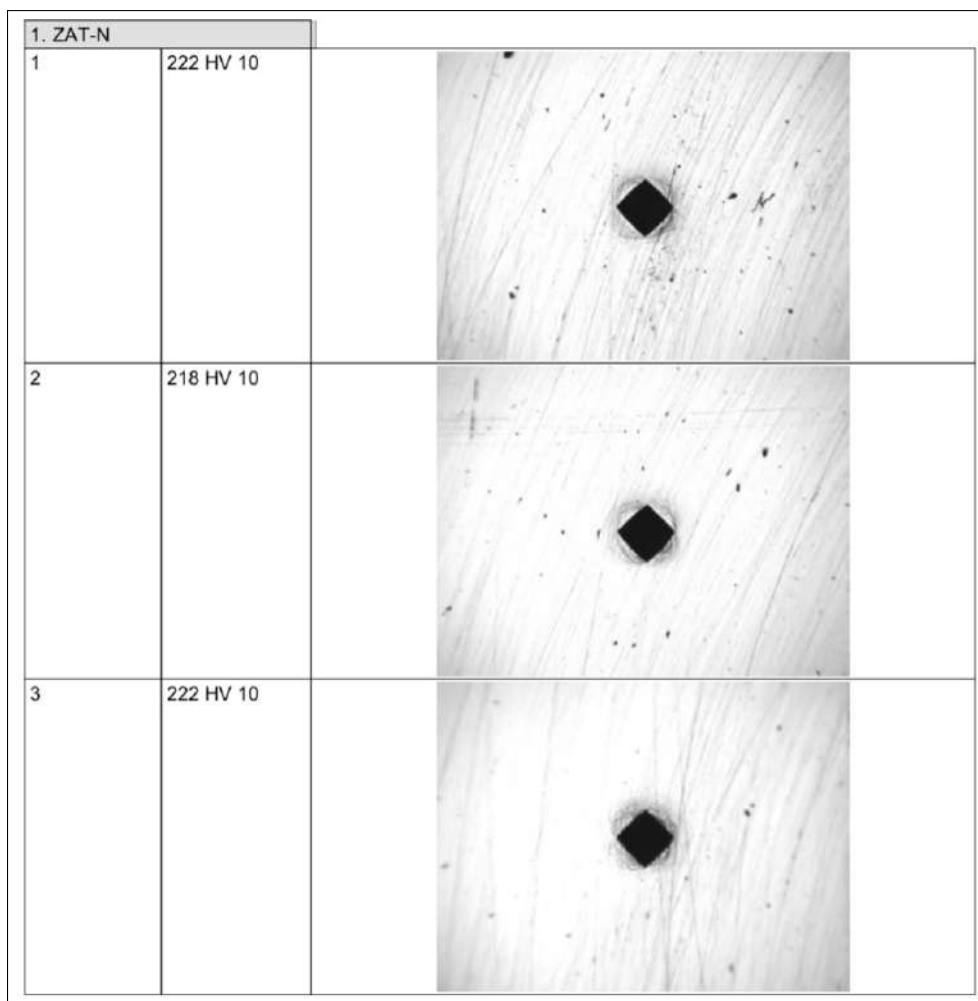


FIGURE 4.13 – Empreintes de micro-dureté Vickers HV10 obtenues sur la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) à l'état d'usinage

Interprétation générale (État Usinage) :

L'analyse globale du profil thermomécanique résiduel à l'état d'usinage (**Figure 4.10**) met en évidence une distribution de micro-dureté remarquablement resserrée et stable à travers l'assemblage soudé. L'écart maximal enregistré entre la zone la plus dure (ZF : 231,33 HV) et la zone la plus adoucie (ZAT : 220,66 HV) ne dépasse pas 11 HV, ce qui témoigne d'une transition métallurgique douce et d'un excellent contrôle des cycles thermiques lors du procédé de soudage industriel de cet acier API X70.

D'une part, l'absence de pics de dureté aciculaires (généralement associés à des phases martensitiques ou bainitiques fragiles dans la ZF ou la ZAT) écarte le risque de fissuration à froid sous cordon. D'autre part, la parfaite horizontalité des trois séries d'essais pour chaque zone confirme la rigueur du protocole de préparation métallographique (polissage mécanique progressif par papiers Buehler), ayant permis d'éliminer complètement l'écrouissage parasite induit lors du découpage initial des éprouvettes.

En somme, cet état initial d'usinage se caractérise par une déformation plastique superficielle nulle et une configuration structurale stable. Il constitue ainsi un état homogène et hautement fiable, indispensable pour quantifier et isoler de manière précise l'effet de l'écrouissage par expansion plastique superficielle qui sera généré par le traitement ultérieur de brunissage à bille.

5.1.2. Évaluation expérimentale de la micro-dureté Vickers 'Etat Brunissage'

Afin de caractériser l'évolution des propriétés mécaniques superficielles induites par le traitement mécanique de surface, des mesures de micro-dureté Vickers (HV10) ont été effectuées sur les mêmes zones de l'assemblage soudé après l'opération de brunissage à bille. La **Table 4.3** regroupe les valeurs quantitatives obtenues ainsi que leurs moyennes respectives, tandis que la **Figure 4.14** illustre graphiquement le profil de cette évolution.

TABLE 4.3 – Valeurs de micro-dureté Vickers (HV10) à l'état de brunissage pour les différentes zones du joint soudé

N°	Etat Brunissage		
	MB	ZF	ZAT
1	250	247	242
2	242	247	230
3	249	236	236
Valeur moyenne	247	243,33	236

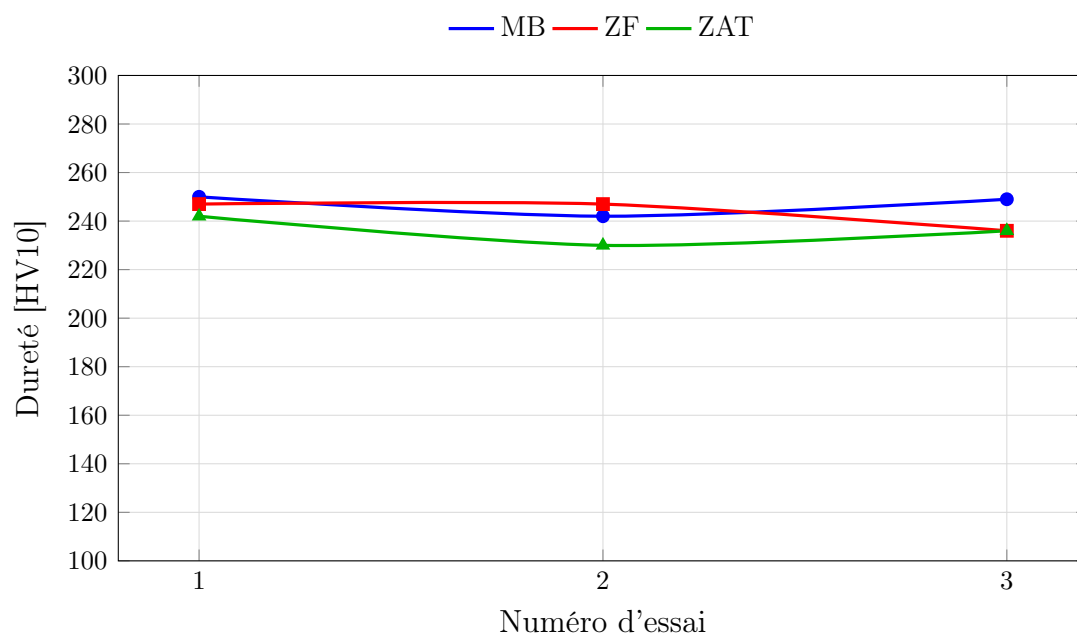


FIGURE 4.14 – Profil d'évolution de la micro-dureté Vickers (HV10) après brunissage à bille (MB, ZF et ZAT)

La **Figure 4.14** illustre la distribution spatiale de la micro-dureté Vickers sous une charge de HV10 après le traitement de brunissage à bille, englobant les trois entités métallurgiques distinctes du joint soudé en acier micro-allié API X70. Les valeurs quantitatives correspondantes, répertoriées dans la **Table 4.3**, révèlent des comportements mécaniques intimement liés à l'intensité de la déformation plastique superficielle induite.

- **Métal de Base (MB)** : À l'état bruni, le MB enregistre les valeurs de micro-dureté les plus élevées du profil, culminant à une valeur moyenne de 247 HV. Le profil d'évolution se distingue par une allure resserrée (comprise entre 242 et 250 HV), ce qui démontre la haute aptitude de la matrice ferrito-perlitique initiale à absorber l'énergie cinétique de la bille. Ce comportement traduit un écrouissage superficiel intense causé par la déformation plastique locale, menant à une augmentation de la densité des dislocations et au raffinement des grains en extrême surface.

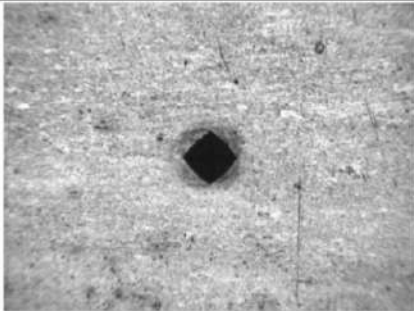
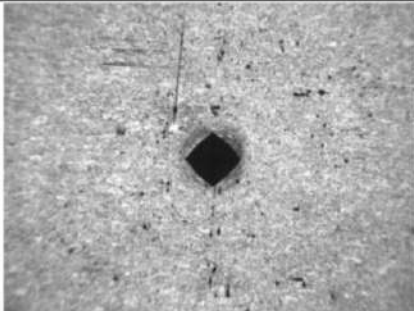
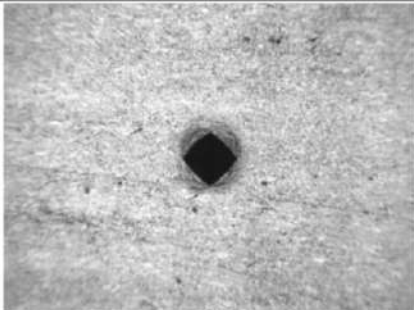
No	Hardness	Picture
1. ep1		
1	250 HV 10	
2	242 HV 10	
3	249 HV 10	

FIGURE 4.15 – Empreintes de micro-dureté Vickers (HV10) obtenues sur le Métal de Base (MB) à l'état de brunissage

- **Zone de Fusion (ZF)** : La ZF affiche des valeurs intermédiaires particulièrement stables, s'établissant à une valeur moyenne de 243,33 HV. La courbe présente une horizontalité rigoureuse entre le premier et le deuxième essai (247 HV) avant de fléchir légèrement au troisième essai (236 HV). Cette cinétique stable indique que malgré la texture brute de coulée hétérogène de la zone fondue, l'action compressive de la bille a imposé une réponse plastique uniforme, limitant l'influence des variations microstructurales locales.

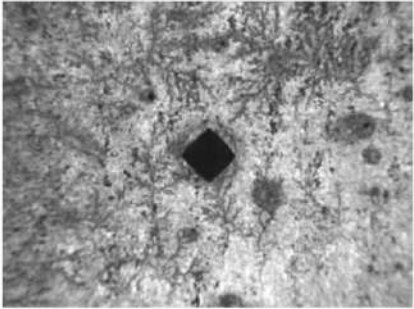
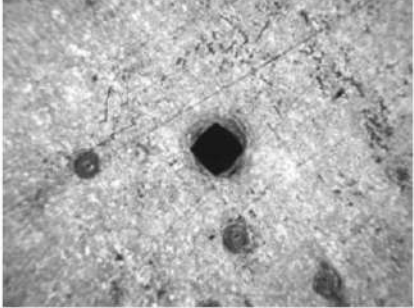
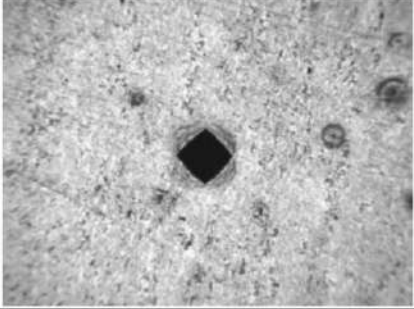
No	Hardness	Picture
1. ep2		
1	247 HV 10	
2	247 HV 10	
3	236 HV 10	

FIGURE 4.16 – Empreintes de micro-dureté Vickers (HV10) obtenues sur la Zone de Fusion (ZF) à l'état de brunissage

- **Zone Affectée Thermiquement (ZAT)** : La ZAT présente ici les valeurs les plus basses du profil, avec une moyenne de 236 HV. L'allure de la courbe évolue de façon linéaire et resserrée entre 230 et 242 HV. Ce comportement stable témoigne d'une restructuration mécanique locale sous l'effet du contact sphérique direct, où la zone d'adoucissement thermique initiale réagit positivement au champ de contraintes de compression résiduelles introduit par le traitement.

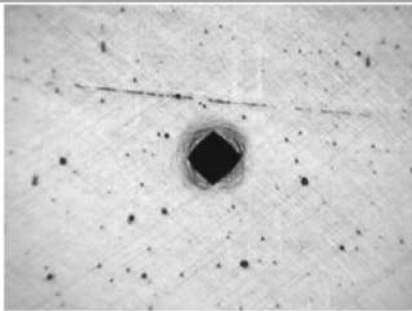
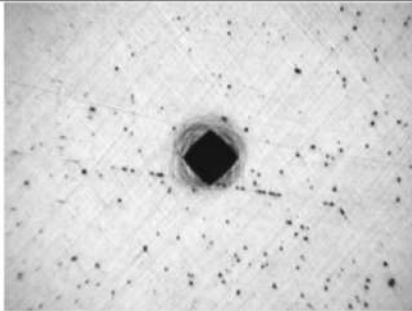
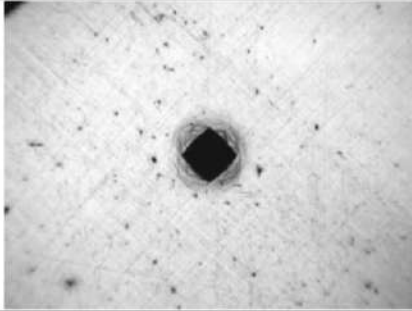
No	Hardness	Picture
1. ep3		
1	242 HV 10	
2	230 HV 10	
3	236 HV 10	

FIGURE 4.17 – Empreintes de micro-dureté Vickers (HV10) obtenues sur la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) à l'état de brunissage

Interprétation générale (État Brunissage) :

L'analyse du profil de micro-dureté après brunissage (**Figure 4.14**) met en évidence une restructuration mécanique homogène de la couche superficielle, avec une valeur moyenne globale de 242 HV.

Du point de vue métallurgique, la stabilisation des profils s'explique par la déformation plastique sévère induite par le contact sphérique sous charge. Ce processus mécanique génère un écrouissage superficiel intense, caractérisé à l'échelle microscopique par une multiplication drastique de la densité des dislocations et un raffinement structural des grains en extrême surface.

La faible dispersion cinétique entre les essais démontre que le traitement a atteint un seuil de saturation plastique. Ce phénomène permet de lisser les hétérogénéités microstructurales initiales des trois zones, augmentant ainsi la régularité des propriétés mécaniques de la surface traitée.

5.1.3. Interprétation générale et analyse comparative (Usinage vs Brunissage)

L'évaluation comparative croisée des profils de micro-dureté avant et après traitement met en évidence l'efficacité mécanique majeure du brunissage à bille sur l'acier micro-allié API X70. À l'état initial d'usinage, le joint soudé se caractérisait par un gradient de dureté dicté par les cycles thermiques du soudage spiral, positionnant la ZF en sommet mécanique (231,33 HV) et la ZAT en zone d'adoucissement thermo-induit (220,66 HV).

Après l'application du brunissage à bille, on assiste à une inversion et à une restructuration complète du profil mécanique superficiel. Cette évolution est analysée de manière spécifique pour chaque zone à travers les courbes comparatives suivantes :

- **Pour le Métal de Base :** La superposition des profils montre un décalage vertical net et uniforme vers les hautes valeurs après traitement. Ce gain quantitatif moyen de +17,34 HV (passant de 229,66 à 247 HV) traduit une excellente réponse élastoplastique de la structure ferrito-perlitique ductile, induisant un écrouissage homogène par multiplication des dislocations sur toute la surface évaluée.

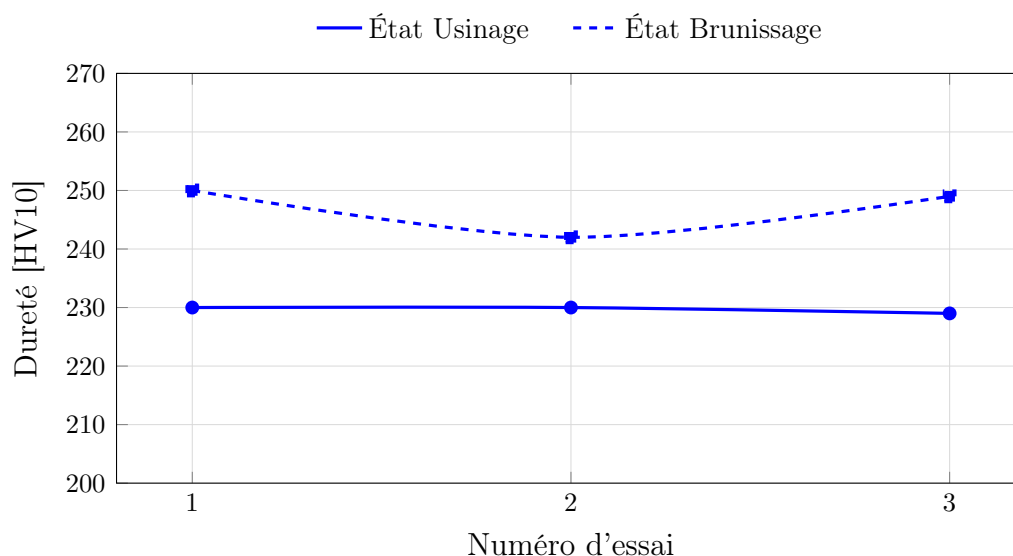


FIGURE 4.18 – Comparaison de la micro-dureté Vickers (HV10) entre l'état d'usinage et de brunissage pour le Métal de Base (MB)

- **Pour la Zone de Fusion :** On observe une stabilisation remarquable du profil bruni (courbe discontinue) par rapport à l'état initial. L'action compressive de la bille a permis d'élever la dureté globale à 243,33 HV tout en lissant efficacement les hétérogénéités structurales d'origine induites par la solidification du cordon.

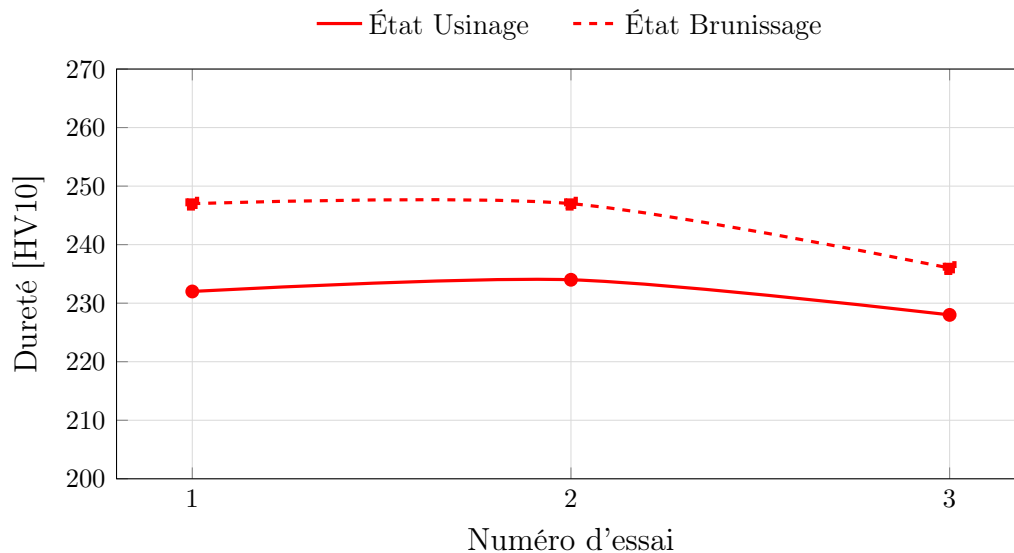


FIGURE 4.19 – Comparaison de la micro-dureté Vickers (HV10) entre l'état d'usinage et de brunissage pour la Zone de Fusion (ZF)

- **Pour la Zone Affectée Thermiquement :** C'est à ce niveau que l'effet compensateur du brunissage est le plus flagrant. La courbe de l'état bruni compense totalement le déficit mécanique initial de la zone d'adoucissement (*softening zone*), élevant sa dureté moyenne à 236 HV, ce qui la ramène à un niveau de résistance équivalent, voire supérieur, à celui du métal de base initial avant traitement.

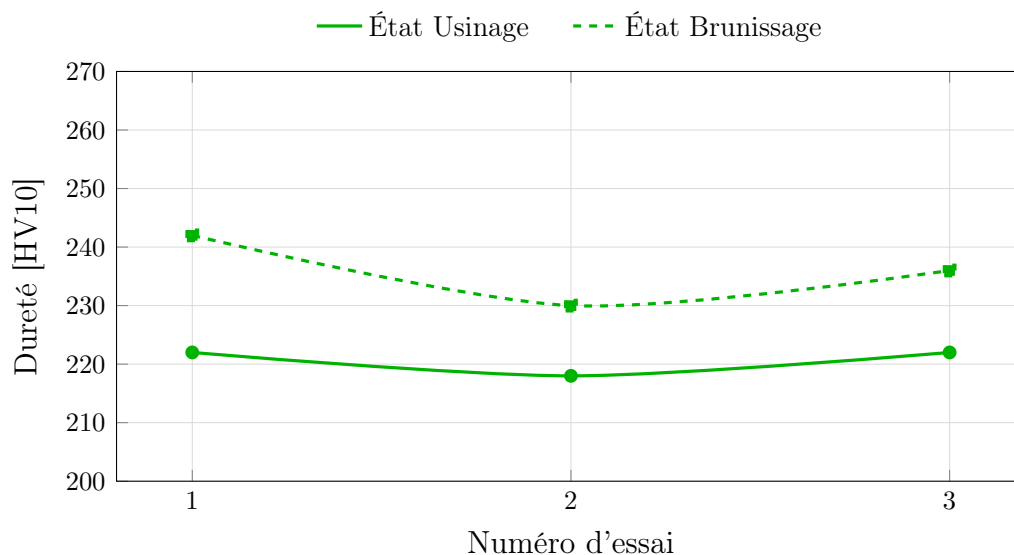


FIGURE 4.20 – Comparaison de la micro-dureté Vickers (HV10) entre l'état d'usinage et de brunissage pour la Zone Affectée Thermiquement (ZAT)

Synthèse mécanique finale :

Le résultat le plus remarquable de cette étude comparative réside dans le resserrement global de toutes les courbes après brunissage dans une plage extrêmement étroite allant de 230 à 250 HV, réduisant l'écart maximal entre les trois zones à seulement 11 HV.

En conclusion, l'apport fondamental du brunissage à bille sur cet assemblage soudé ne se limite pas à une simple élévation locale de la dureté, mais se traduit principalement par une homogénéisation mécanique complète de la surface. En éliminant l'hétérogénéité initiale induite par le procédé de soudage spiral ainsi que les faiblesses thermiques locales (**Figures 4.18, 4.19 et 4.20**), et en introduisant un champ uniforme de contraintes de compression résiduelles, ce traitement atténue drastiquement les concentrations de contraintes en service. Par conséquent, il améliore de façon significative la durabilité structurale et la résistance mécanique globale des tubes de pipelines en acier micro-allié API X70.

6. Essai de traction

Les essais mécaniques du matériau ont été étudiés à l'aide de plusieurs essais : Il s'agit du test le plus fondamental puisqu'il permet de fournir toutes les caractéristiques qui définissent le comportement (ductile ou fragile) du matériau.

Les essais de traction ont été conduits sur une machine d'essai universelle à commande hydraulique MFL de type VHP 600 (**Figure 4.21**). C'est une machine d'une capacité de 60 tonnes pilotée par un ordinateur avec un logiciel Zwick. La fixation des éprouvettes s'effectue à l'aide de têtes d'amarrages hydrauliques avec des coins de serrage interchangeables en fonction des dimensions et du type des éprouvettes. Cette machine permet des vitesses de traction comprises entre 1 et 300 mm/min [36].

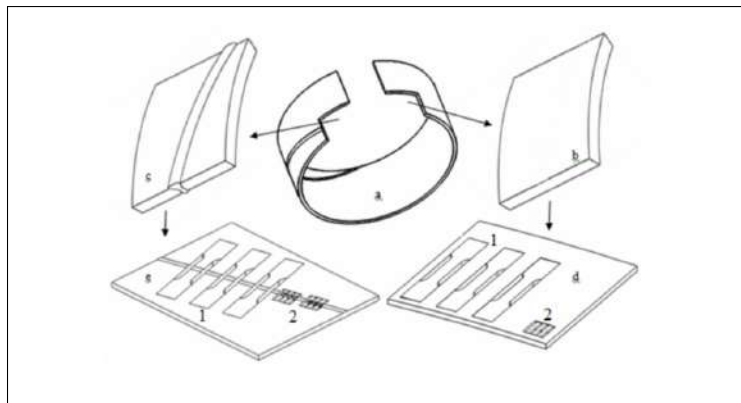


FIGURE 4.21 – Méthode de prélèvement des échantillons du tube soudé en spirale en diamètre de 1219 mm, acier X70 norme API 5L, 1) échantillons de traction, 2) échantillons de résilience [39]

Pour être représentatives des structures industrielles, les éprouvettes ont été usinées à partir de plaques prismatiques prélevées dans le sens transversal des tubes et redressées à la presse. Les feuilles ont été découpées au moyen d'une torche de soudage puis aplaties. Ensuite, les ébauches ont été sciées à au moins 50 mm de la bordure afin d'éviter l'effet de la chaleur de coupe. Les échantillons de traction ont été taillés sur une fraiseuse horizontale.

L'essai de traction a été effectué sur deux séries de trois éprouvettes. Le prélèvement est tel que les éprouvettes du premier lot sont entièrement usinées dans le métal de base (MB). Pour le deuxième lot, le cordon de soudure est contenu dans la partie active de l'éprouvette (**Figure 4.22**) [36].

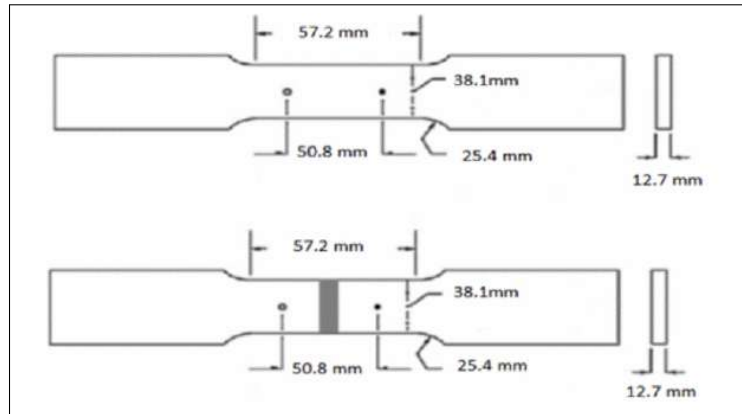


FIGURE 4.22 – Géométrie d'éprouvette de traction en acier X70 [36].

La **Figure 4.23** donne la forme et les dimensions des éprouvettes telles que recommandées par la norme API. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques prélevées directement à partir des tubes de diamètre 1219,2 mm et d'épaisseur 12,7 mm [36].



FIGURE 4.23 – Géométrie de l'éprouvette de traction en acier X70 selon la norme API [36].

6.1. Résultats et interprétation

Les résultats des trois essais de traction ont été scindés afin de distinguer le comportement du métal de base de celui du joint soudé. La **Table 4.4** présente les caractéristiques obtenues sur les éprouvettes TN (Métal de Base), tandis que la **Table 4.5** regroupe les valeurs associées aux éprouvettes TS (Zone de Soudure).

TABLE 4.4 – Résultats des essais de traction – Éprouvettes TN

Essai	S_0 (mm ²)	$R_{t0.5}$ (MPa)	R_m (MPa)	$R_{t0.5}/R_m$	A_{50} (%)
<i>Spécif. Max</i>	–	635,0	760,0	0,90	–
<i>Spécif. Min</i>	–	485,0	570,0	–	20,0
1	490,6	527,5	662,2	0,80	33,6
2	491,5	531,8	629,8	0,84	34,7
3	491,1	568,1	673,2	0,84	33,5
Moyenne	491,07	542,47	655,07	0,83	33,93

TABLE 4.5 – Résultats des essais de traction – Éprouvettes TS

Essai	S_0 (mm ²)	$R_{t0.5}$ (MPa)	R_m (MPa)	$R_{t0.5}/R_m$	A_{50} (%)
<i>Spécif. Max</i>	–	635,0	760,0	0,90	–
<i>Spécif. Min</i>	–	485,0	570,0	–	20,0
1	488,1	–	706,9	–	–
2	488,4	–	694,8	–	–
3	489,2	–	720,2	–	–
Moyenne	488,57	–	707,30	–	–

Les résultats des essais de traction sont illustrés graphiquement par les courbes contrainte-déformation présentées dans les figures suivantes. Ces courbes ont été obtenues pour les trois séries d'essais, sur les éprouvettes de type TN prélevées dans le métal de base et les éprouvettes de type TS contenant le cordon de soudure.

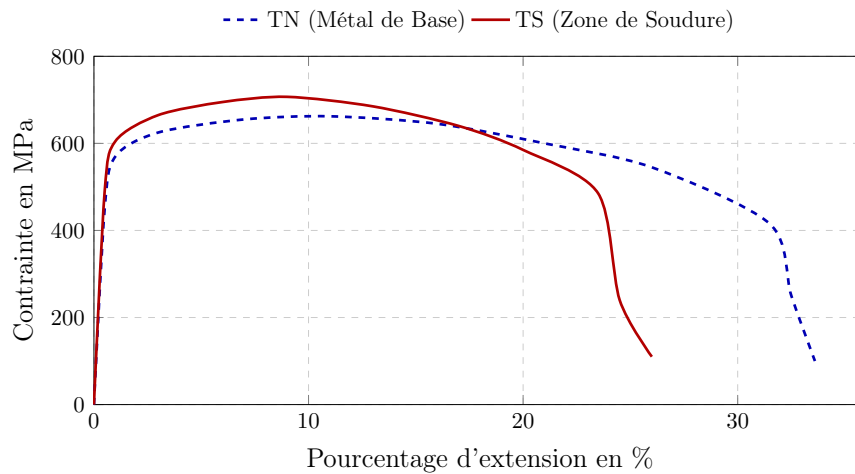


FIGURE 4.24 – Essai 1 – Courbes contrainte-déformation comparées de l'éprouvette TN 1.1 (métal de base) et de l'éprouvette TS 1.2 (contenant le cordon de soudure).

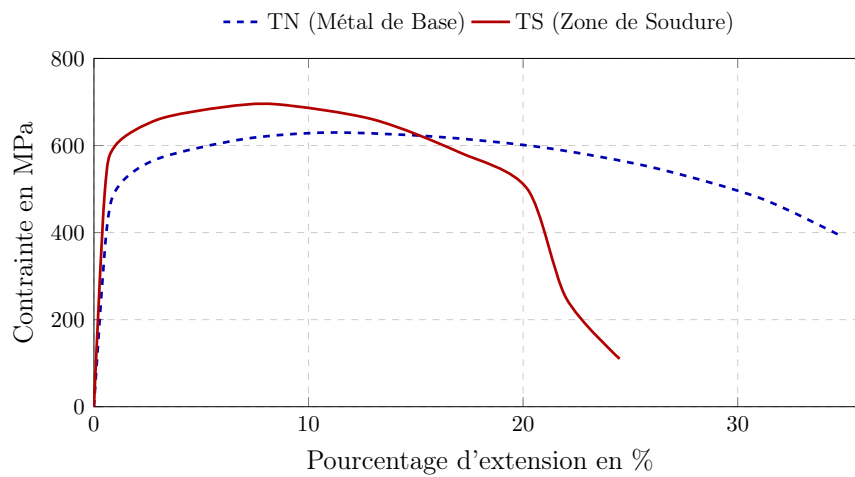


FIGURE 4.25 – Essai 2 – Courbes contrainte-déformation comparées de l'éprouvette TN 1.1 (métal de base) et de l'éprouvette TS 1.2 (contenant le cordon de soudure).

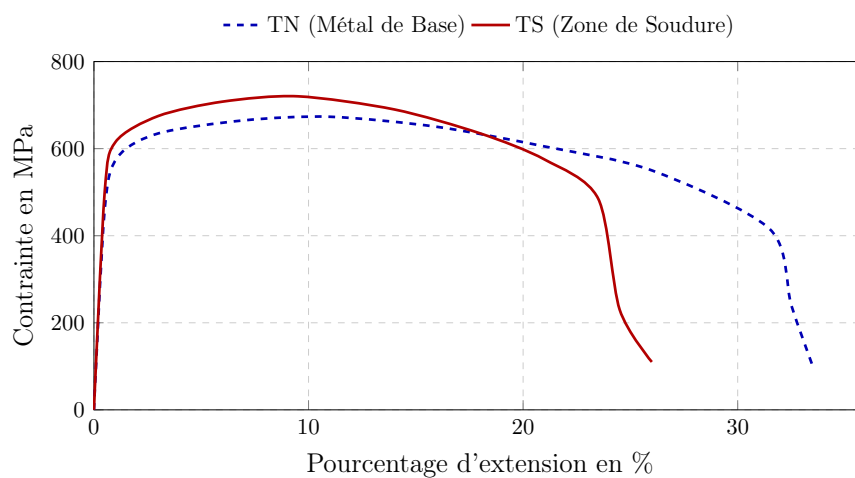


FIGURE 4.26 – Essai 3 – Courbes contrainte-déformation comparées de l'éprouvette TN 1.1 (métal de base) et de l'éprouvette TS 1.2 (contenant le cordon de soudure).

L'analyse des résultats obtenus permet de formuler les observations suivantes :

- **Concernant la limite élastique $R_{t0.5}$** : Les valeurs obtenues pour les éprouvettes TN varient entre 527,5 MPa et 568,1 MPa, ce qui est parfaitement conforme aux exigences de la norme API (485–635 MPa). Ces valeurs confirment que l'acier X70 présente une résistance élastique suffisante pour les applications pipelinières.
- **Concernant la résistance à la traction R_m** : Les valeurs de R_m des éprouvettes TN sont comprises entre 629,8 MPa et 673,2 MPa, tandis que celles des éprouvettes TS sont plus élevées, allant de 694,8 MPa à 720,2 MPa. Cette différence s'explique par la présence du cordon de soudure dans les éprouvettes TS, dont la microstructure plus fine confère une résistance mécanique légèrement supérieure à celle du métal de base. Toutes les valeurs restent dans la plage normative (570–760 MPa).
- **Concernant le rapport $R_{t0.5}/R_m$** : Ce rapport, qui traduit le degré d'écrouissage du matériau, est compris entre 0,80 et 0,84 pour les éprouvettes TN, valeurs inférieures à la limite maximale de 0,90 imposée par la norme. Un rapport faible indique une bonne capacité de déformation plastique avant rupture, ce qui est favorable à la sécurité des pipelines.
- **Concernant l'allongement à rupture A_{50}** : Les valeurs d'allongement obtenues oscillent entre 33,5 % et 34,7 %, largement supérieures au minimum requis de 20 %. Ces résultats témoignent d'une excellente ductilité du matériau, confirmant son comportement ductile tel qu'observé sur les courbes contrainte-déformation.

Analyse des courbes contrainte-déformation :

Les courbes contrainte-déformation obtenues lors des trois essais présentent un profil typique des aciers à haute limite élastique, caractérisé par une montée élastique rapide et linéaire, suivie d'une transition élasto-plastique progressive sans palier de Lüders prononcé — phénomène lié à la présence des éléments microalliants (Nb, V, Ti) qui bloquent le mouvement des dislocations. Un durcissement par écrouissage est ensuite observé jusqu'à l'atteinte de la résistance maximale R_m , suivi d'une striction et d'une rupture ductile confirmée par des allongements à rupture élevés, compris entre 33,5 % et 34,7 %. Par ailleurs, les éprouvettes TS affichent un R_m légèrement supérieur à celui des éprouvettes TN, en raison de la microstructure plus fine du cordon de soudure. L'ensemble de ces résultats confirme la conformité de l'acier X70 aux exigences de la norme API 5L.

7. Essai De Résilience

Les essais ont été conduits sur une machine Charpy de capacité maximale de 300 J (**Figure 4.27**), avec des éprouvettes de type Charpy-V standard [36].

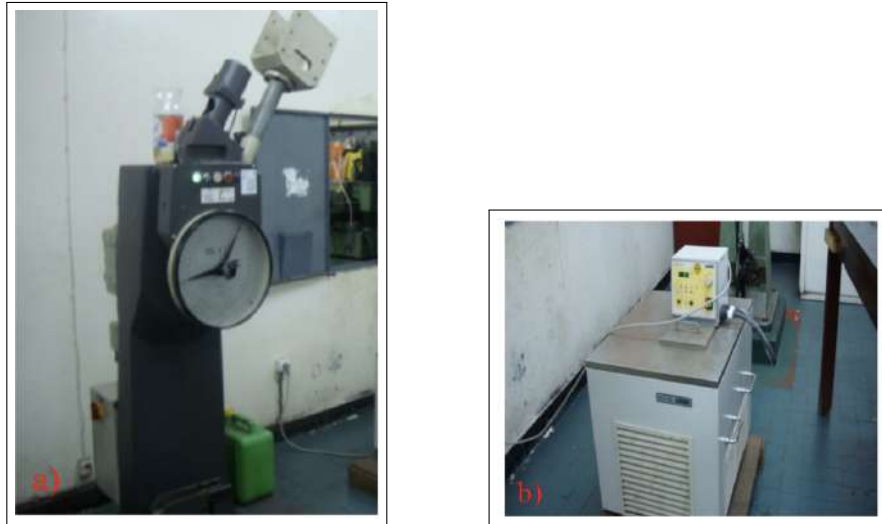


FIGURE 4.27 – a) Machine d'essai de Charpy (Zwick), b) Four [36]

Les éprouvettes ont été préparées à partir d'une tôle prélevée directement sur le pipe parent [36].

La fabrication de ces éprouvettes est étudiée de telle sorte que l'encoche sera usinée soit dans le métal de base, soit dans la zone de fusion ou encore dans la zone affectée thermiquement (**Figure 4.28**). L'usinage s'effectue sur une fraiseuse verticale ou au moyen d'un outil de coupe de forme spéciale pour les encoches [36].

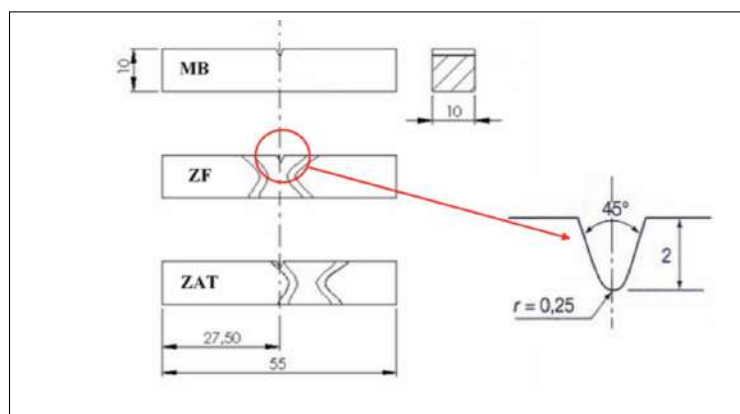


FIGURE 4.28 – Position de l'entaille en V dans les échantillons de résilience sur les trois zones de soudage, a) métal de base, b) zone de fusion, c) zone affectée thermiquement [39]

Les éprouvettes sont placées sur la machine d'essai sur deux appuis distants de 45 mm (**Figure 4.29**). Nous avons réalisé tous nos essais entre -10 et $+40$ °C, avec une échelle de température de 20 °C. Pour souligner l'influence du traitement mécanique de surface (TMS), certaines éprouvettes avaient été préalablement brunies à la bille, alors que d'autres étaient restées à l'état d'usinage [36].

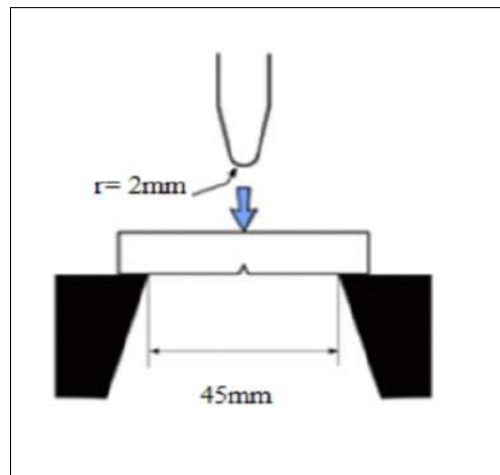


FIGURE 4.29 – Mise en place d'éprouvette [36]

7.1. Résultats et Interprétation

7.1.1. Effet de la température sur l'énergie absorbée (éprouvettes usinées)

La **Figure 4.30** illustre l'évolution de l'énergie absorbée K_{cv} en fonction de la température pour les trois zones de soudage (MB, ZF et ZAT), dans le cas des éprouvettes à l'état usiné, pour une plage de température allant de -10 °C à $+40$ °C.

a) Métal de base (MB)

Le métal de base enregistre les valeurs d'énergie absorbée les plus élevées sur toute la plage testée. À -10 °C, l'énergie est d'environ 215 J, et elle atteint ~ 250 J à partir de 0 °C, avec une légère stabilisation au-delà. Cette zone n'ayant pas subi les effets thermiques du soudage, sa microstructure reste homogène, ce qui lui confère une ductilité et une ténacité supérieures. L'évolution croissante avec la température est caractéristique d'un matériau en transition fragile-ductile.

b) Zone de fusion (ZF)

La zone de fusion présente les valeurs les plus faibles parmi les trois zones. À -10 °C, l'énergie absorbée est d'environ 175 J, et elle croît progressivement jusqu'à ~ 200 J à $+20$ °C. Cette fragilisation relative est due à la microstructure de solidification formée lors du cycle de fusion-refroidissement du procédé de soudage : structure dendritique,

ségrégations chimiques et porosités éventuelles constituent des sites préférentiels d'amorçage de fissures lors de l'impact. Néanmoins, les valeurs restent acceptables pour un acier de pipeline.

c) Zone affectée thermiquement (ZAT)

La ZAT adopte un comportement intermédiaire entre MB et ZF. L'énergie absorbée passe d'environ 190 J à -10 °C à ~ 210 J à $+20$ °C. Le cycle thermique du soudage a induit un grossissement de grains et des transformations microstructurales partielles sans atteindre la fusion, réduisant modérément la ténacité par rapport au métal de base mais restant supérieure à celle de la zone de fusion.

TABLE 4.6 – Essai de résilience à différent température [36]

Température T (°C)	MB	ZF	ZAT
-10	220	168	178
0	248	178	186
10	250	200	212
30	255	210	222

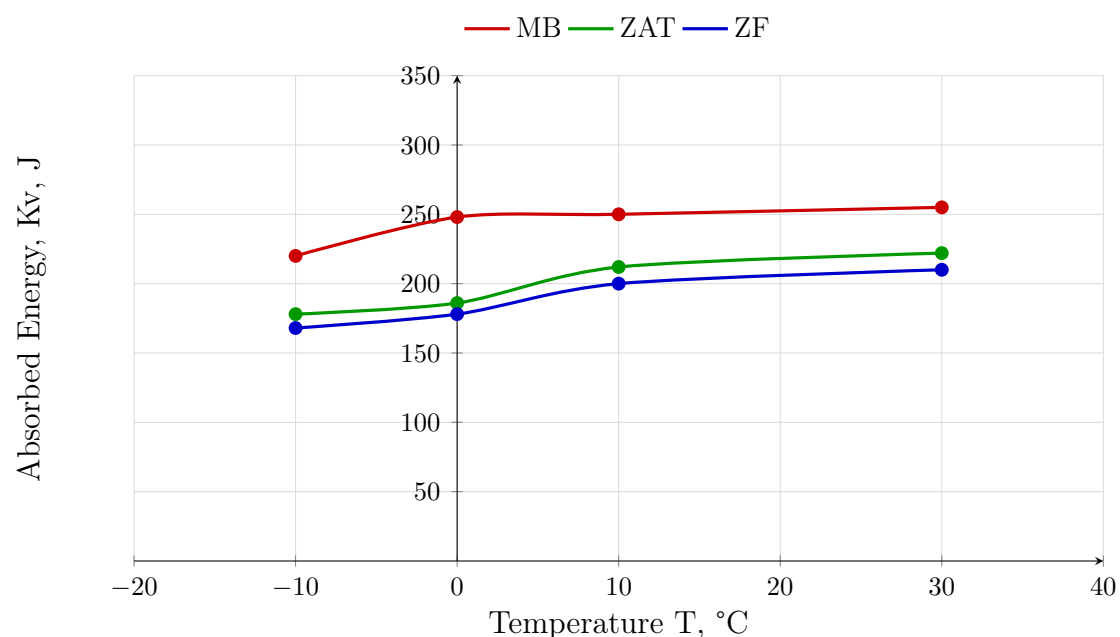


FIGURE 4.30 – Effet de la température sur l'énergie absorbée dans les éprouvettes usinées (MB, ZF et ZAT) [36]

L'amélioration de la résilience après brunissage est attribuée à l'introduction de contraintes résiduelles de compression à la surface du matériau. Ces contraintes retardent l'amorçage et la propagation des fissures, ce qui améliore la capacité du matériau à absorber l'énergie avant rupture [40].

7.1.2. Synthèse et conclusion

L'ensemble des résultats montre que :

- L'énergie absorbée augmente avec la température pour les trois zones, ce qui traduit un comportement en transition fragile-ductile sur la plage -10 à $+40$ °C.
- Le classement de résilience est : $MB > ZAT > ZF$.
- La zone de fusion constitue le maillon le plus critique de l'assemblage soudé vis-à-vis de la tenue aux chocs, en raison de sa microstructure de solidification moins favorable.
- Malgré cela, aucune des trois zones ne présente de chute brutale d'énergie absorbée, ce qui indique que le matériau conserve une bonne ductilité dans cette plage de température.

8. Effet de brunissage à l'état de surface de l'acier x70

8.1. Effet de brunissage sur la dureté

Le traitement mécanique a été effectué à l'aide d'un brunissage à bille sur une fraiseuse verticale. Le brunissage des éprouvettes en traction n'a pu être réalisé à cause de la soudure sur l'éprouvette. Une solution est donc d'étudier le brunissage à bille par des mesures de dureté sur des éprouvettes dédiées.

La **Figure 4.31** montre la morphologie de la surface avant et après le brunissage. La **Figure 4.31 (a)** donne l'aspect d'une surface fraisée où l'on voit les bandes laissées par la fraise. La **Figure 4.31 (b)** représente l'effet du brunissage : les traces circulaires laissées par l'outil montrent que la pression de la bille provoque des déformations des aspérités qui s'entrecroisent après chaque passage en rotation sur la pièce [36].

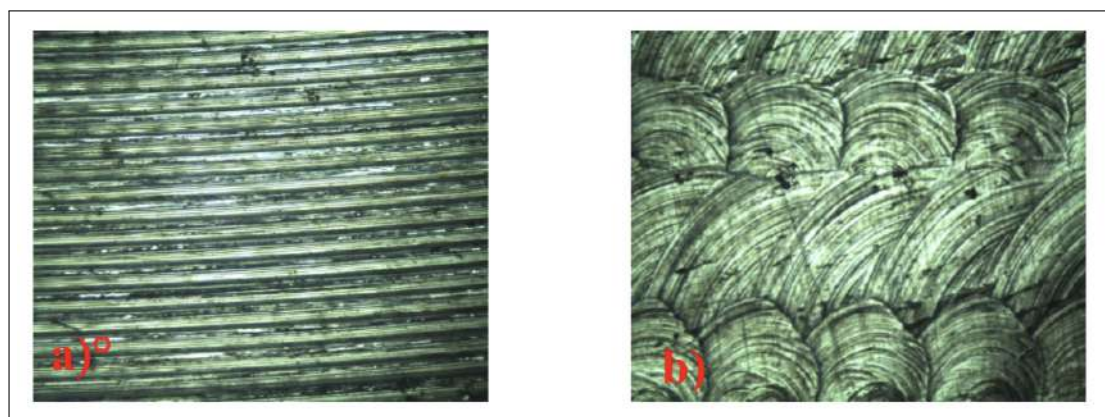


FIGURE 4.31 – Aspect de surface de l'acier X70 : a) État après usinage (fraisage), b) État après l'opération de brunissage [36]

Ainsi, les rainures rectilignes au fraisage se sont incurvées et aplaties après le traitement mécanique de surface (TMS). Un aspect plus soigné de la soudure découlait de ce traitement et probablement une meilleure rugosité; de prime abord, cet aspect pouvait faciliter l'indentation et l'observation des empreintes de dureté Vickers.

Les essais de dureté ont été effectués dans trois zones différentes (MB, ZF, et ZAT) comme le préconise la norme API, chaque zone devant faire l'objet de trois essais distincts. Pour éviter l'effet de la DP et par conséquent l'écaillage autour de chaque empreinte, les indentations ont été réalisées de manière à ce que la distance entre elles soit au moins égale à trois fois le diamètre moyen de l'empreinte (**figure 4.32**) [36].

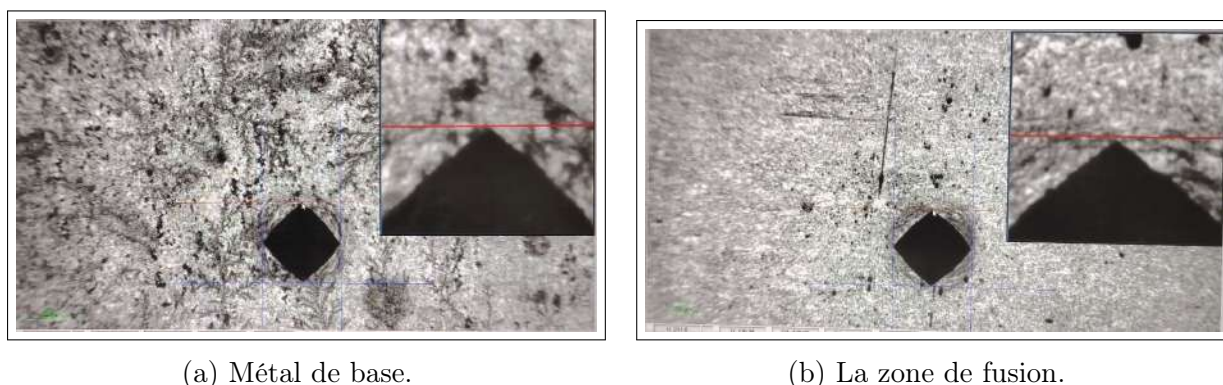


FIGURE 4.32 – Géométrie d'indentation [36]

8.2. Effet de brunissage sur la résilience

La **figure 4.33** illustre l'évolution de la résilience en fonction de la température de l'acier X70 à l'état d'usinage entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dans cette plage de température, les trois zones (MB, ZF et ZAT) présentent des niveaux d'énergie absorbée distincts dès le départ : le métal de base (MB) affiche la résilience la plus élevée ($\sim 250\text{ J}$ à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), tandis que la zone de fusion (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT) présentent des valeurs plus faibles ($\sim 175\text{ J}$).

Dans cette gamme de température $[-10, +40\text{ }^{\circ}\text{C}]$, les trois courbes évoluent de manière quasi linéaire et progressive avec une faible pente, ce qui indique que le matériau se trouve globalement dans un régime ductile sur l'ensemble de la plage étudiée. Les éprouvettes usinées dans le métal de base (MB) absorbent plus d'énergie à la rupture que celles usinées dans la zone de fusion (ZF) ou dans la zone affectée thermiquement (ZAT), et ce sur toute la plage de température considérée. À $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, les trois zones convergent vers des valeurs voisines ($\sim 210\text{ J}$ pour ZF et ZAT, et $\sim 255\text{ J}$ pour MB).

Un tel résultat pourrait s'expliquer par le fait qu'en grande partie la zone de fusion (ZF) et à moindre degré la zone affectée thermiquement (ZAT) subissent d'intenses modifications structurales à cause de la température de soudage et peuvent perdre leur ductilité par rapport au métal de base (MB). De plus, durant le refroidissement, des défauts de structure tels que précipités ou inclusions peuvent fragiliser le matériau qui résistera moins aux chocs [36].

TABLE 4.7 – Essai de résilience à différent température [36]

Température T (°C)	MB	ZF	ZAT
-10	220	168	178
0	248	178	186
10	250	200	212
30	255	210	222

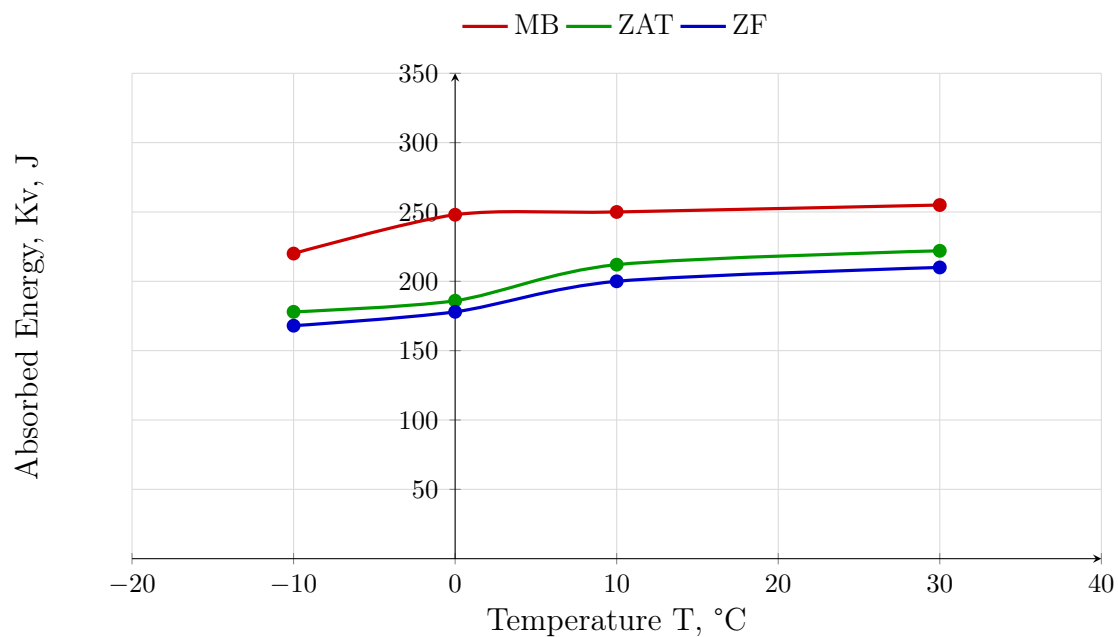


FIGURE 4.33 – Effet de la température sur l'énergie absorbée dans les éprouvettes usinées (MB, ZF et ZAT) [36]

Sous l'effet du brunissage, l'évolution de la résilience en fonction de la température présente un comportement sensiblement différent de celui observé dans le cas de l'usinage (figure 4.34). Plusieurs particularités ont été relevées.

À basse température (-10 °C), les trois zones présentent des niveaux d'énergie distincts et inversés par rapport au cas usiné : la zone affectée thermiquement (ZAT) affiche la résilience la plus élevée (~ 240 J), suivie de la zone de fusion (ZF) (~ 210 J), tandis que le métal de base (MB) enregistre la valeur la plus faible (~ 165 J). Ce résultat suggère que le brunissage bénéficie davantage aux zones ZAT et ZF à basse température,

là où l'écrouissage superficiel induit par ce traitement compense en partie la fragilisation structurale due au soudage.

À 0 °C, les courbes des trois zones se croisent et convergent vers une valeur commune d'énergie absorbée d'environ 225 J, faisant de cette température un point caractéristique des courbes de résilience après brunissage.

Au-delà de 0 °C, la tendance s'inverse progressivement : le métal de base (MB) reprend sa prédominance et affiche la résilience la plus élevée, atteignant ~ 280 J à +40 °C, tandis que ZF et ZAT évoluent plus modérément pour se stabiliser autour de ~ 240 J. Ce comportement indique que le brunissage retrouve pleinement ses effets bénéfiques lorsque le matériau est dans un état ductile, facilitant ainsi la déformation plastique et l'écrouissage en surface [36].

TABLE 4.8 – Traitement mécanique [36]

Température T (°C)	MB	ZF	ZAT
-10	152	172	216
0	215	216	224
10	272	228	236
30	283	234	241

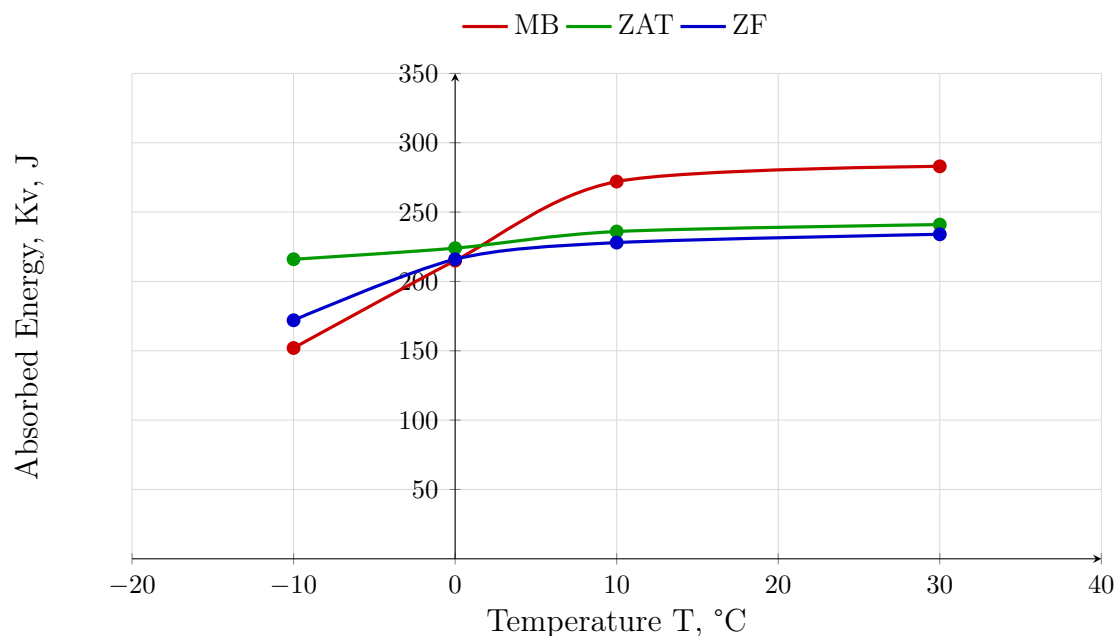


FIGURE 4.34 – Effet de la température sur l'énergie absorbée dans les éprouvettes traitées par brunissage [36]

La **Figure 4.35** permet de comparer directement l'effet du brunissage sur la résilience des trois zones (MB, ZF et ZAT) à deux températures caractéristiques : -10°C (TTDF) et +20°C (ambiante).

À -10°C (**Figure 4.35 a**), le brunissage entraîne une diminution de la résilience du métal de base (MB) qui passe de 220 J (usiné) à 150 J (bruni), alors qu'il provoque une légère amélioration pour la zone de fusion (ZF) (170 J dans les deux cas) et une nette amélioration pour la zone affectée thermiquement (ZAT) qui passe de 175 J à 215 J. Ce résultat confirme que le brunissage est défavorable au MB à basse température, tandis qu'il bénéficie clairement à la ZAT.

À $+20^{\circ}\text{C}$ (**Figure 4.35 b**), la tendance s'inverse : le brunissage améliore la résilience de toutes les zones, notamment le métal de base (MB) qui passe de 250 J à 270 J, la ZF de 200 J à 225 J, et la ZAT de 210 J à 237 J. Cela confirme que le traitement mécanique de surface (TMS) par brunissage retrouve ses effets bénéfiques lorsque le matériau est dans un état ductile, où la déformation plastique est plus aisée et l'écroutissage superficiel plus efficace [36].

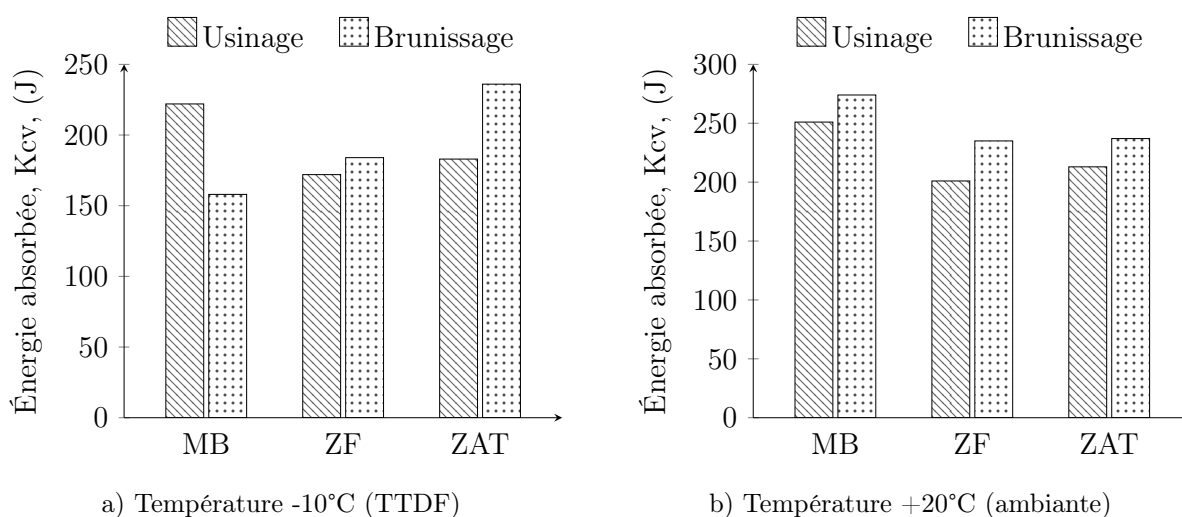


FIGURE 4.35 – Effet du brunissage sur la résilience [36]

Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus dans ce chapitre ont permis de mettre en évidence l'effet bénéfique du brunissage à bille sur les propriétés de surface de l'acier X70. Il a été constaté que ce traitement mécanique entraîne une augmentation notable de la dureté superficielle, attribuable à l'écroutissage induit par la déformation plastique en surface. De même, une amélioration de la résilience a été observée, témoignant d'une meilleure résistance du matériau aux sollicitations dynamiques. Par ailleurs, la réduction de la rugosité de surface consécutive au brunissage contribue à limiter les sites d'amorçage de fissures et à améliorer la résistance à la corrosion. L'ensemble de ces résultats confirme la pertinence et l'efficacité du brunissage à bille comme traitement de surface adapté à l'acier X70 utilisé dans les applications pipelinières.

Conclusion Générale

Le présent travail avait pour objectif d'étudier l'effet du brunissage à bille sur l'état de surface de l'acier X70, largement utilisé dans la fabrication des pipelines de transport d'hydrocarbures. Cette étude a été conduite à travers une approche combinant une revue bibliographique approfondie et une démarche expérimentale rigoureuse.

L'analyse de la littérature a permis de mettre en évidence les caractéristiques particulières des aciers HLE de grade X70, dont les propriétés mécaniques élevées résultent d'une optimisation synergique de la composition chimique — notamment par l'addition de microalliages au niobium, au vanadium et au titane — et des paramètres de laminage contrôlé. Ces aciers présentent une microstructure fine et homogène qui conditionne favorablement leur comportement en service.

Sur le plan expérimental, les résultats obtenus ont permis de dégager plusieurs enseignements majeurs :

- En ce qui concerne la **dureté**, le brunissage à bille a entraîné une augmentation sensible de la dureté superficielle de l'acier X70. Ce phénomène s'explique par l'écrouissage induit par la déformation plastique en surface, qui conduit à une densification des dislocations dans les couches superficielles du matériau.
- Sur le plan de la **résilience**, le traitement par brunissage a montré une influence notable sur la ténacité du matériau, les contraintes résiduelles de compression introduites en surface contribuant à retarder l'amorçage des fissures et à améliorer la résistance aux sollicitations dynamiques.
- Concernant l'état de surface, le brunissage à bille a permis de réduire significativement la rugosité de surface, conduisant à un état de surface plus lisse et plus favorable à la résistance à la corrosion et à la fatigue.

Les résultats obtenus confirment que le brunissage à bille constitue un traitement mécanique de surface efficace pour l'amélioration des propriétés superficielles de l'acier X70. Cette technique permet notamment d'augmenter la dureté, d'améliorer l'état de surface et d'accroître la résistance à l'endommagement mécanique. Ces améliorations contribuent directement à la fiabilité et à la durabilité des pipelines utilisés dans le transport des hydrocarbures.

En définitive, ce travail confirme que le brunissage à bille constitue un traitement de surface efficace et pertinent pour l'amélioration des performances mécaniques et de l'intégrité de surface de l'acier X70. Ce procédé présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, reproductible et compatible avec les exigences industrielles du secteur pipelinier.

Enfin, des perspectives futures peuvent être envisagées afin d'étudier l'influence des paramètres de brunissage sur la tenue en fatigue et la résistance à la corrosion de l'acier X70.

Comme perspectives, il serait intéressant d'élargir cette étude à l'influence des paramètres opératoires du brunissage — force d'application, vitesse d'avance, nombre de passes — afin d'optimiser les conditions de traitement. De plus, des essais complémentaires de fatigue et de corrosion permettraient de quantifier plus précisément l'apport de ce traitement dans les conditions réelles d'exploitation des pipelines.

Bibliographie

- [1] L. N. Hamaiidi and A. Boutifour, “Étude de la maintenance d’une structure métallique contre l’usure par corrosion,” Master’s thesis, Université Ibn Khaldoun Tiaret, Algérie, 2023.
- [2] A. Doudou, “Etude des caractéristiques mécaniques et des performances électrochimique d’un acier api 5l x70,” Master’s thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, n.d.
- [3] Association Française de Génie Civil, “Les aciers à haute limite d’élasticité,” tech. rep., AFGC, 2024. Consulté en 2026.
- [4] American Society for Metals, *Metals Handbook*.
- [5] A. Ghosh and A. Chatterjee, *Ironmaking and Steelmaking : Theory and Practice*. Taylor & Francis, 2008.
- [6] M. Hansen, *Constitution of Binary Alloys*. Elsevier, 2004.
- [7] E. C. Bain and J. C. Griffiths, “The nature of martensite,” *Springer*.
- [8] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, ch. 9 : The Tension Test, pp. 329–377. McGraw-Hill, international student ed., 1976.
- [9] H. Bouchelliga, “Identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l’acier x70 d’alfapipe,” Master’s thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2016.
- [10] S. Messerhi, “Etude caractéristique des propriétés mécaniques de l’acier x70 et sa tenue à la corrosion,” Master’s thesis, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2022.
- [11] A. Khelfat, “Analyse des éléments du revêtement des pipelines,” mémoire de master, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2016.
- [12] Y. Guernoub, “Soudage et caractérisation des tubes hle de l’unité alfapipe annaba,” Master’s thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2019.
- [13] I. Macha and Z. Chellali, “Etude d’un processus de fabrication d’un tube pipeline,” Master’s thesis, Université Amar Thelidji - Laghouat, Algérie, 2022.
- [14] W. Boughaba, “Etude comparative du comportement à la corrosion de deux aciers hle avec l’étude de l’influence de la température dans h2so4,” Master’s thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2018.

- [15] K. Benarfa and M. Djalleb, "Etude des caractéristiques mécaniques des joints soudés d'un tube en acier à haute limite d'élasticité," Master's thesis, Université Echahid Echikh Larbi Tébessi - Tébessa, Algérie, 2025.
- [16] M. M. Talai, "Etude du comportement mécanique du cordon de soudure de pipeline sous l'effet de la réparation," Master's thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2019.
- [17] Y. Benabdelmoumene and A. Chergui, "Analyse d'endommagement d'une fissure circonférentielle elliptique dans un pipeline api 5l x65 soumis aux chargement mixte (pression & moment)," Master's thesis, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Aïn-Temouchent, Algérie, 2020.
- [18] M. Genty, *Étude des relations microstructures-propriétés mécaniques dans les zones affectées thermiquement (ZAT) de joints soudés*. Thèse de doctorat, École nationale supérieure d'arts et métiers (ENSAM), 2024.
- [19] A. Bougabrine, "Etude des propriétés des tubes soudés en spirale utilisé pour la fabrication des pipelines," Master's thesis, Université Echahid Echikh Larbi Tébessi - Tébessa, Algérie, 2024.
- [20] M. Allouti, *Étude de la nocivité de défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaisons*. Thèse de doctorat en génie mécanique, option : mécanique des matériaux, Université Paul Verlaine de Metz, 2010.
- [21] WELD Magazine, "Fissuration des soudures : les principes de base." weldmagazine.com, 2026. Disponible sur : weldmagazine.com.
- [22] Y. Boumelita, "Dégradation des propriétés mécaniques du cordon de soudure d'un acier api x70 en fonction de la succession des réparations : Application dureté," Master's thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2017.
- [23] K. Chikhi, "Effet d'un traitement thermique sur les propriétés mécaniques et la résistance à la piqûration d'une soudure d'un acier à haute limite élastique api x52 dans un milieu industriel simulé," 2014. Sous la direction du Pr. M.E. Djeghlal, Promotion juin 2014.
- [24] M. Djouadi and M. Henda, "Étude et caractérisation de l'acier x60m utilisé pour la fabrication des tubes d'adduction du gaz," Master's thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2021.
- [25] H. Lazizi, "Influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et structurales de l'alliage al-4%cu trempé dans un fluide à 70% ho et 30% d'huile soluble," Master's thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2013.

- [26] B. Ben Kechroud, “Etude comparative de quatre aciers pour pipeline pour sonatrach réalisés à la tss arcelor mittal-annaba selon les paramètres physico chimique et choix de l’acier x52,” Master’s thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2014.
- [27] I. Mazouz and E. Djafour, “Caractérisation d’une soudure sur l’acier api slx60m réalisée par le procédé saw,” Master’s thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2021.
- [28] M. Feraga, “Etude des singularités géométriques des pipelines, cas du cordon de soudure et de la corrosion,” mémoire de master, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2018.
- [29] O. Taâmallah, “Effet des traitements mécaniques de surface (tms) sur l’écrouissage et la ténacité d’un acier,” Master’s thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2012.
- [30] J. Lu, *Traitements de surface mécaniques*. Université de Technologie de Troyes (UTT), 2006. Professeur en génie mécanique.
- [31] L. Laouar, *Traitement mécanique de surface par brunissage des aciers XC48 et XC18 – Optimisation et caractérisation*. Thèse de doctorat d’État, Université Badji Mokhtar - Annaba, Algérie, 2007.
- [32] M. EL-Axir, “An investigation into roller burnishing,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 1603–1617, September 2000.
- [33] L. Luca, S. Neagu-Ventzel, and I. Marinescu, “Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 157–158, pp. 239–244, December 2004.
- [34] H. Djaber and Y. Chaabna, “Contribution à l’Étude de l’intégrité de surface de l’acier x52 sous l’effet du brunissage à bille,” mémoire de master, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2022.
- [35] E. Velázquez Corral, *Application du procédé de brunissage à bille sur des pièces à symétrie de révolution pour améliorer leur résistance à la fatigue et leurs propriétés d’usure*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) & Universitat Politècnica de Catalunya (BarcelonaTech), 2023. NNT : 2023INPT0080. Disponible sur HAL.
- [36] A. Bounouara, *Caractérisation mécanique et simulation en fatigue des pipes en acier X70*. Thèse de doctorat lmd, Université Badji Mokhtar - Annaba, Algérie, 2019. Spécialité : Mécanique de la rupture ; sous la direction du Pr. Hamid Hamadache.
- [37] M. Ozer, K. Dalli, and A. Ozer, “Effect of ball-burnishing on surface integrity and fatigue behaviour of 7175-t6 aa,” *Materials Science and Technology*, 2022.
- [38] M. A. Rahmani and Y. Ouggad, “Recherche expérimentale sur l’impact du brunissage sur la dureté des matériaux usinés,” mémoire de master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2024.

- [39] A. Bounouara, H. Hamadache, and A. Amirat, “Investigation on the effect of ball burnishing on fracture toughness in spiral API X70 pipeline steel,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, no. 9–12, pp. 4543–4551, 2018.
- [40] A. Tobias, J. A. Rodriguez, and M. Martinez, “Effect of ball burnishing on residual stress distribution, crack initiation behavior, and impact toughness of high-strength low-alloy steels,” *Materials Science and Engineering : A*, vol. 862, pp. 144–158, 2023.