



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: Technologie

DEPARTEMENT : Génie- mécanique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : - Macha Idriss

- Chellali Zahia

DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : Génie Mécanique

OPTION : Fabrication Mécanique

Thème

**Etude d'un processus de fabrication d'un tube
Pipeline**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Belaid Salim	MCA	Président
Mechraoui Amer	MCB	Examineur I
Maati Ahmed	MCA	Encadreur

Promotion : Juin 2022



REMERCIEMENTS

*Je remercie tout d'abord «Allah» qui m'a donné
la force et la patience nécessaire pour réaliser
ce modeste travail.*

Je remercie mon encadreur

Mr. Ahmed Maati

*Je remercie également les enseignants du
département de génie mécanique et mes collègues
ainsi que mes amis.*

*Enfin, je remercie tout ceux qui m'ont aidé de
réaliser ce travail.*





Dédicace


*Avec beaucoup de respect
et d'amour*

Je dédie ce modeste travail à :

*Ma mère pour tous les sacrifices, les efforts
prodigieux, a consentie pour moi qu'elle trouve ici
le témoignage de mon profond amour et respect.*

*Mon père pour le soutien, les efforts, et les
conseils qu'il m'a apporté durant toutes les
années d'études.*

A toutes les familles.



*Je dédie cet humble travail à toute la famille
universitaire.*

Indice

Résumé.....	8
Introduction Générale.....	9

Chapitre I *Généralités sur les pipelines*

I.1. Définition.....	11
I.2. Caractéristiques des tubes	11
I.3. Différents types des canalisations	11
I.4. Gazoducs	12
I.5. Construction et exploitation des gazoducs	12
I.6. Défauts rencontrés dans les canalisations	14
I.7. Avantages de pipelines	15

Chapitre II

Processus de fabrication D'un pipeline

II.1. Introduction.....	18
II.2. Présentation du lieu de fabrication d'un pipeline d'hydrocarbures.....	18
II.3. Aciers à haute limite d'élasticité.....	19
II.3.1. Introduction.....	19
II.3.2. Influence de la composition chimique	19
II.3.3. Propriétés mécaniques des aciers X70	20
II.3.4. Propriétés métallurgiques (Composition chimique).....	20
II.3.5. Avantage des aciers HLE	20
II.3.6. Laminage à chaud des aciers HLE	20
II.3.7. Bobinage	20
II.4. Soudage.....	22
II.4.1. Généralité sur le soudage	22

II.4.2.Zone Affectée Thermiquement (ZAT)	23
II.4.3. Différents types de soudage	23
II.4.4.Défauts de soudure	24
II.4.5.Principaux défauts de soudure	24
II.5.Process de fabrication	24
II.5.1.Introduction	24
II.5.2.Tubes soudés sous la forme en spirale	25
II.5.3.Zone fabrication	26
II.5.3.1.Basculeur de bobines	26
II.5.3.2.Machine de préparation bobine	28
II.5.3.3.Machine à souder	29
II.5.3.4.Rabotage	30
II.5.3.5.Guidage	30
II.5.3.6.Dressage bande	30
II.5.3.7.Cisaillage	30
II.5.3.8.Formage de la bande	30
II.5.3.9.Deux machines nettoyage tubes	30
II.5.4.Zone visuelle	30
II.5.5.Revêtement des tubes	31
II.5.5.1.Revêtement extérieur	30
II.5.5.2.Revêtement intérieur	30
II.5.6.Contrôle de qualité	31
II.5.7.Contrôle non destructif (CND)	32
II.5.7.1Contrôles visuels	33
II.5.7.2.Contrôle par radioscopie	33
II.5.7.3.Control par hydrostatique	33
II.5.7.5.Contrôle final	38
II.6.Essais utilises pour la caractérisation	38
II.6.1.Contrôle destructif	38
II.6.1.1.Introduction	38
II.6.1.2.Prélèvement des échantillons	39

II.6.2.Essais utilisés	39
II.6.3.Analyse chimique	39
II.6.3.1.Introduction.....	39
II.6.3.2.Caractéristiques chimiques	39
II.6.3.3.Carbone équivalent de l'acier	41
II.6.4.Essais de dureté.....	40
II.6.4.1.Généralités.....	41
II.6.4.2.Essais Vickers.....	42
II.6.5.Essai de traction	44
II.6.6.Essai de résilience.....	48
II.6.6.1.Introduction.....	48
II.6.6.2.Principe de l'essai.....	50
II.6.6.3.Mouton pendule de Charpy	50
II.6.6.4.Corrélation entre l'énergie Charpy et la ténacité.....	51
II.6.7.Essais de pliage.....	50
II.6.8.Essais réalisés	51
II.6.8.1.Analyse chimique	51
II.6.8.2.Résultats d'analyse chimique sur les machine A et B à ALPHAPIPE	52
II.6.8.3.Résultat de la composition chimique.....	52
II.6.9.Essai dureté	53
II.6.9.1.Résultats expérimentaux de l'essai dureté Vickers (HV 10).....	53
II.6.9.2.Résultats essai de dureté sur les machine A et B à ALPHAPIPE	54
II.6.10.Essai de traction	55
II.6.10.1.Résultats essai de traction sur les machine A et B à ALPHAPIPE	59
II.6.10.2.Des exemples avec les graphes des différents tubes	60
II.6.11.Essai de résilience.....	62
II.6.11.1.Eprouvette	62
II.6.11.2.Caractéristiques géométriques	63
II.6.12.Analyse des résultats.....	65
II.6.13.Corrélation entre la résilience et la ténacité du matériau	69
II.6.15.Essai de pliage	70

II.7.Conclusion générale.....	71
-------------------------------	----

Chapitre 3

Processus industriel et simulation numérique d'une opération de cintrage d'un tube

III.1.Introduction	73
III.2. Roulage de tôle.....	73
III.3. Différents types de rouleuses.....	74
III.4.Phases de l'opération	74
III.5.Code de calcul utilisé.....	76
III.6. Simulation d'une opération de roulage.....	76
Conclusion.....	86
Bibliographs.....	89

Liste des figures

Chapitre I

Généralités sur les pipelines

Fig.I.1 : pipelines des hydrocarbures.....	11
Fig.I.2 : Eclatements avec rupture franche de la canalisation.....	12

Chapitre II

Processus de fabrication D'un pipeline

Fig.II.1 : Bobine.....	20
Fig.II.2 : Les déférentes zones de soudure.....	22
Fig.II.3 : Les tubes soudés sous la forme en spirale.....	23
Fig.II.4 : Angle d'introduction de la bande.....	24
Fig.II.5 : basculeur de bobine.....	25
Fig.II.6 : Machine de préparation bobine.....	25

Fig.II.7 : Machine à souder de pipe.....	26
Fig.II.8 : Revêtement FBE.....	28
Fig.II.9 : Revêtement extérieur.....	29
Fig.II.10 : Revêtements interieur en résine époxy liquide pour les pipelines	30
Fig.II.11 : Contrôle visuel.....	32
Fig.II.12 : Control radioscopie.....	33
Fig.II.13 : Control hydrostatique.....	34
Fig.II.14: Control par ultrasons.....	35
Fig.II.15: Machine d'analyse chimique.....	38
Fig.II.16: Préparation de l'échantillon. (a) rectification (b) attaque chimique et (c) état finale.....	40
Fig.II.17: Variation de dureté Vickers dans les trois zones.....	41
Fig.II.18: Procédure et machine de dureté (Type Vickers).....	41
Fig.II.19: (a) bobine et (b) la virole, (c) éprouvette avec de traction.....	43
Fig.II.20: Emplacement des prélèvements des éprouvettes dans le tuyau, Eprouvette de traction.....	43
Fig.II.21: Courbes de traction nominale et vraie.....	44
Fig.II.22: Mouton Charpy (Alpha-Pipe, Ghardaïa).....	45
Fig.II.23: Géométrie et prise de vue de l'éprouvette d'essai de résilience.....	46
Fig.II.24: Représentation du mouton pendule de Charpy et hauteurs à prendre en compte pour le calcul de L'énergie absorbée.....	47
Fig.II.25: Machine de pliage	48
Fig.II.26: Etat final.....	48
Fig.II.27: Eprouvettes avec joint de soudure bout à bout pour la dureté Vickers (Acier X 70.....	51
Fig.II.28: Evolution de la dureté Vickers en fonction de la distance mesurée de tube B596.....	53
Fig.II.29: Eprouvette normalise selon la norme API5L.....	54
Fig.II.30: Machine d'essais de traction.....	55
Fig.II.31: Graphe de traction sur tube A110.....	57
Fig.II.32: Graphe de traction sur tube B1234.....	58
Fig.II.33: Graphe de traction sur tube A156.....	58
Fig.II.34: Graphe de traction sur tube B1282.....	59
Fig.II.35: Graphe de traction sur tube A395	60
Fig.II.36: Eprouvette normalisée de l'essai de résilience.....	61

Fig.II.37: Éprouvette de résilience après la rupture à différentes températures pour le métal de base et Métal avec soudure. [17].....	62
Fig.II.38: Résultat de l'essai de résilience à différentes températures pour le métal de base.....	63
Fig.II.39: Courbe de l'essai de résilience à différentes températures pour le métal avec soudure.....	64
Fig.II.40: Courbe de l'essai de résilience à différentes températures pour le MB et avec MS.....	64
Fig.II.41: Courbe de la ténacité pour les éprouvettes de métal de base et les éprouvettes avec un joint de soudure.....	66

Chapitre 3

Processus industriel et simulation numérique d'une opération de cintrage d'un tube

Fig. III.1 : Rouleuses de Type planeur à 3 rouleaux.....	71
Fig. III.2 : Étapes de formation.....	72
Fig. III.3 : Conditions aux limites appliquées dans le Step « Cintrage »	75
Fig. III.4 : Evolution de la force RF du rouleauG sur la tôle.....	79
Fig. III.6: Evolution de la contrainte de vonMises en fonction de la déformation équivalente.....	80
Fig. III.6 : Variation de la contrainte équivalente suivant un trajet bien défini (Path1.....	81

Listes des tableaux

Chapitre II

Processus de fabrication D'un pipeline

Tableau. II.1 : Caractéristiques mécanique de l'X70 selon l'API5L.....	17
Tableau. II.2 : Composition chimique de l'acier X70	17
Tableau. II.3 : Paramètre de contrôle visuel.....	31
Tableau. II.4 : Composition chimique X70.....	37
Tableau. II.5: Exigence de la composition chimique pour analyses nuance X70.....	42
Tableau. II.6 : Dimension d'éprouvette (Normalisée).....	42
Tableau. II.7 : Propriétés mécaniques de l'acier grade API X70.....	44
Tableau. II.8 : Propriétés mécaniques limite selon les exigences des clients.....	44
Tableau. II.9 : Résultats de l'analyse chimique.....	50

Tableau. II.10 : Résultats d’essai Vickers.....	52
Tableau. II.11 : La norme API 5L PSL2	54
Tableau. II.12 : Résultats essai de traction sur tube A110.....	57
Tableau. II.13 : Résultats essai de traction sur tube B1234.....	57
Tableau. II.14 : Résultats essai de traction sur tube A156.....	58
Tableau. II.15 : Résultats essai de traction sur tube B1282.....	59
Tableau. II.16 : Résultats Essai de traction d’essai de traction tube A395	59
Tableau. II.17 : Caractéristiques géométriques.....	61
Tableau. II.18 : Les résultats expérimentaux de l’essai de résilience à différentes températures des éprouvettes de métal de base (MB.....	63
Tableau. II.19 : Les résultats expérimentaux de l’essai de résilience à différentes températures des éprouvettes avec joint de soudure.....	63
Tableau. II.20 : Résultat du facteur d’intensité de contrainte KIC ($MP\sqrt{m}$).....	65
Tableau. II.21 :Résultats du facteur d’intensité de contrainte KIC ($MPa\sqrt{m}$).....	66
Tableau. II.22 : L’essai de pliage selon la norme API 5L.....	67

Chapitre 3

Processus industriel et simulation numérique d'une opération de cintrage d'un tube

Tableau. III.1 :Caractéristiques géométriques et mécaniques des éléments de roulage.....	74
Tableau. III.2 :Condition aux limites adoptées	75
Tableau. III.3 :Maillage de la structure	76

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier les méthodes de fabrication des canalisations utilisées pour le transport des hydrocarbures (gaz et pétrole). Grâce à ce que nous avons recueilli sur les méthodes de fabrication adoptées par l'entreprise ALFAPIPE GHARDAIA, nous avons constaté que le procédé de production des pipes en acier HLE est en spirale et soudés à l'arc submergé (SAW). nous avons également constaté que le type d'acier utilisé est bien l'acier API5L X70 pour ces bonnes propriétés physiques et mécaniques.

Au final nous avons fait un exemple de simulation d'une opération de roulage (cintrage) d'une tôle d'acier en utilisant le code de calcul EF Abaqus. Des résultats de simulation ont été mis en évidence.

les mots clés : Pipeline, Abaqus, Acier X70 , roulage, HLE.

Abstract

The objective of this work is to study the manufacturing methods of pipes used for the transport of hydrocarbons (gas and oil). Thanks to what we have collected on the manufacturing methods adopted by the company ALFAPIPE GHARDAIA, we have found that the production process of HLE steel pipes is spiral and submerged arc welded (SAW). We also found that the type of steel used is API5L X70 because it has good physical and mechanical properties.

In the end we made an example of rolling simulation of a steel sheet, using the Abaqus computer code. Simulation results have been highlighted.

key words: Pipeline , Abaqus , Steel X70, Rolling, HLE steel.

ملخص

الهدف من هذا العمل دراسة طرق تصنيع الأنابيب المستخدمة في نقل المحروقات (الغاز والنفط) , و بفضل ما جمعناه حول طرق التصنيع المعتمدة من قبل شركة ALFAPIPE GHARDAIA ، وجدنا أن عملية إنتاج الأنابيب الفولاذية HLE تتم بشكل حلزوني ونوع اللحام هو (SAW). وجدنا أيضاً أن نوع الفولاذ المستخدم هو API5L X70 لأنه يتمتع بخصائص فيزيائية وميكانيكية جيدة.

. في النهاية ، قدمنا مثالاً لمحاكاة التدرج للصفائح الفولاذية ، باستخدام كود الكمبيوتر Abaqus. تم تسليط الضوء على نتائج المحاكاة.

الكلمات المفتاحية: النقل عبر خطوط الأنابيب . خط الأنابيب. فولاذ X70 . محاكاة .

Introduction Générale

Les tubes soudés en acier à haute limite d'élasticité laminés à chaud trouvent leurs applications dans de nombreux domaines : gros tubes pour transport du gaz liquéfié et d'hydrocarbures, est le moyen de transport de l'eau pour l'agriculture et l'eau potable à partir des barrages....etc.

Le développement industriel des pipes en acier HLE exige une maîtrise parfaite du processus de fabrication, par conséquent, le produit doit satisfaire les conditions techniques suivantes :

- Absence de défauts métallurgique et de défauts de procédé de soudage.
- Propriétés mécaniques (résistance, ductilité).
- Tolérance dimensionnelles (épaisseur, largeur et longueur).

Ces tubes en aciers faiblement alliés au Nb-V-Ti ont subi de soudage en spirale. Le soudage est une technique qui permet de réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage rigide de manière à assurer une bonne homogénéité de la matière. De point de vue performance, cet assemblage soudé doit offrir des garanties optimales de sécurité et d'endurance en service en respectant la norme demander par le constructeur.

La qualité l'assemblage par soudure prend ses racines à divers stades de la construction ou d'utilisation. Pour le cas des tubes, la soudure doit être faite de manière efficace. Afin d'éviter la corrosion dans la zone soudure.

Nous sommes intéressés dans ce travail à l'étude des processus de fabrication d'un pipeline, et étudie le type de l'acier utilisé pour les pipes.

Nous présenterons dans le premier chapitre des généralités sur les pipelines et leurs applications. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des processus de fabrication d'un pipeline destiné au transport des hydrocarbures. Le dernier chapitre donne un exemple de simulation d'une opération de mise en forme par déformation plastique d'un tube en acier élaboré par cintrage. Au cours de cette simulation, l'influence de quelques paramètres est mise en évidence. Enfin, l'étude est terminée par une conclusion générale et des perspectives du travail.

Chapitre I

Généralités sur les pipelines

I.1 Définition

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des biens, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol. Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés, en zone de risque sismique ou politiquement instable. Au contraire de leur investissement initial, leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances[2].

I.2 Caractéristiques des tubes

La plupart des pipelines sont faits d'acier, bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les pipelines d'acier est fabriqué en soudant de courtes sections de tuyaux (20 m) les uns aux autres. Après la radioscopie de l'assemblage, le tuyau est ensuite enveloppé d'une couche protectrice avant d'être enterré. Tous les pipelines, sans exception, font l'objet d'une inspection en plus d'être soumis à une épreuve de pression avant leur utilisation. Ces caractéristiques principales (diamètres, épaisseur, type d'acier, spécifications de construction, température et pression d'exploitation...) sont régies par tout un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et de compromis économiques. Le diamètre d'une canalisation est déterminé en fonction du débit des produits à acheminer, de leur viscosité et de leur densité, de façon à réaliser un compromis économique entre la puissance des stations de pompage ou de compression à installer et l'importance de l'investissement total à réaliser[3].

I.3 Différents types des canalisations

Selon le produit transporté, les pipelines portent des noms spécifiques : gazoduc, oléoduc, etc.Ceux-ci sont assujettis à une réglementation qui leur est propre tout comme le sont les techniques de construction et d'exploitation. Les principaux systèmes de transport par canalisation concernent[2] :

- Le gaz naturel, transporté par gazoduc
- Les hydrocarbures liquides, dont surtout le pétrole, transportés par oléoduc.

Il existe bien d'autres produits acheminés sur des distances parfois importantes, justifiant le terme de «transport», par différenciation avec des distributions locales[4]:

- L'eau douce, principalement pour l'irrigation, dans des conduites ou émissaires ou aqueducs.

- L'eau salée ou saumâtre, appelée « saumure », dans des saumoducs.
- L'oxygène dans des oxygénoducs.
- L'hydrogène dans des hydrogénoducs.
- L'éthylène dans des éthylénoducs.

I.4 Gazoducs

La majorité des gazoducs acheminent du gaz naturel entre les zones d'extractions et les zones de consommation ou d'exportation. On estime la longueur totale des gazoducs dans le monde à un million de kilomètres, soit plus de 25 fois la circonférence terrestre. Les gazoducs sont en majorité terrestre, soit enfouis à environ un mètre de profondeur dans les zones habitées, soit posés à même le sol en zone désertique, ou en zone à sol dur. Leur diamètre varie entre 50 mm (2 pouces) et 1400 mm (56 pouces) pour les plus importants.

Toutefois, le tarissement des sources de proximité et l'éloignement croissant des zones d'exploitation ont conduit à l'établissement de gazoducs sous-marins. Selon leur nature d'usage, les gazoducs peuvent être classés en trois familles principales[4]:

- **Gazoducs de collecte** : Ramenant le gaz sorti des gisements ou des stockages souterrains vers les sites de traitement.
- **Gazoducs de transport ou de transit** : Acheminant sous haute pression le gaz traité (déshydraté, désulfuré ...) aux portes des zones urbaines ou des sites industrielles de consommation.
- **Gazoducs de distribution** : Répartissant le gaz à basse pression au plus près des consommateurs domestiques ou des petites industries.

I.5. Construction et exploitation des gazoducs

Les gazoducs sont constitués de tubes d'acier soudés bout à bout, recouverts d'un matériau isolant (polyéthylène, polypropylène, ..) contribuant à leur protection contre la corrosion. Ils peuvent être également revêtus intérieurement pour améliorer l'écoulement du fluide transporté ou pour prévenir la corrosion interne si le gaz transporté est corrosif. Selon leur nature d'usage, les gazoducs sont exploités par des industriels de l'exploration production, du transport ou de la distribution. L'exploitation d'un gazoduc consiste à maintenir l'ouvrage en bon état de service dans les conditions optimales de sécurité et de coût.

Aujourd'hui, il y a des millions de Km de pipelines qui sont largement utilisé pour transporter de l'eau, du gaz et du pétrole sous ou dessous terre ou sous mer, depuis les sources originales jusqu'aux usines de traitement des liquides (filtration, raffinage, liquéfaction,...), Fig. I.1.



Fig.I.1 : pipelines des hydrocarbures. [21]

Les tubes sont susceptibles d'être attaqués par un phénomène de corrosion interne et externe, de fissuration ou bien de faille de fabrication. La corrosion interne et externe sont la cause principale de fuites et de ruptures des canalisations, se traduisant parfois par des dégâts catastrophiques (dégâts humains, pollution du milieu naturel, frais supplémentaires de réparation, arrêt prolongé du pompage, etc.). Si un pipeline porteur d'eau est affecté d'un éclatement de fuite, au moins cela ne nuit pas à l'environnement. Cependant, si c'est la fuite de pipeline est de pétrole ou produit chimique, cela peut être un désastre environnemental, Fig. I.2.



Fig.I.2 : Eclatements avec rupture franche de la canalisation[21].

I.6 Défauts rencontrés dans les canalisations

Bien que le transport de produits dangereux par pipeline soit considéré comme un moyen de transport sûr et malgré la gestion rigoureuse du réseau de pipelines, des défaillances sont identifiées principalement dans la surveillance des travaux effectués dans ce couloir. La sécurité du réseau de transport et la disponibilité, exempte de perturbations de l'agent énergétique gaz naturel sont incontournables si l'on veut garantir la prospérité économique. La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à la corrosion, ainsi que leur incidence sur l'économie mondiale et leur impact sur l'environnement rendent le transport des hydrocarbures de plus en plus préoccupant. Les cas les plus fréquents sont relatifs à des incidents amorcés à partir de défauts issus soit de l'élaboration du matériau, soit de la fabrication, de l'assemblage, de la réparation ou des conditions d'exploitations des tubes et qui ont conduit à la naissance et à la propagation des fissures superficielles où traversantes suivies de fuites. On trouve six catégories principales de causes des accidents [6]:

- ✓ Agression externe ou activité tierce (le plus répandu) ;
- ✓ Corrosion interne ou externe ;
- ✓ Défaut de construction ou défaillance de matériels ou défaut mécanique ;
- ✓ Mouvement de terrain ou risques naturels en général ;
- ✓ Erreurs opérationnelles ;
- ✓ Autres et causes inconnues ;

La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à la corrosion, ainsi que leur incidence sur l'économie mondiale et leur impact sur l'environnement rendent le transport des hydrocarbures de plus en plus préoccupant. L'examen des incidents sur les tuyauteries montre que dans un certain nombre de situations, les méthodes traditionnelles de calcul de résistance ne permettent pas un dimensionnement fiable.

I.7 Avantages de pipelines

Pour le transport de grandes quantités de liquide (le liquide ou le gaz), un pipeline est certainement le mode le plus privilégié de transport. Même pour les solides, il y a beaucoup de cas cette faveur le pipeline sur d'autres modes de transport. Les avantages des pipelines sont [7] :

Économiques dans beaucoup de circonstances. Les facteurs qui préfèrent des pipelines incluent grand débit, terrain accidenté et environnement hostile (tel que transport par les marais). Sous les conditions ordinaires, les pipelines peuvent liquides de transport (liquides ou gaz) à une fraction du prix de transport par le camion ou le train Le transport ferme par le pipeline est beaucoup plus complexe et coûteux que le transport liquide. Consommation d'énergie basse. Le fait d'être intensif d'énergie de grands pipelines est beaucoup inférieur que ce de camions et est encore inférieur que ce de rail. Le fait d'être intensif d'énergie est défini comme l'énergie consommée dans le transport poids d'unité de chargement sur la distance d'unité, dans les unités telles que Btu partonmile.

Sympathique à l'environnement. C'est dû principalement au fait que la plupart des pipelines sont le métré. Ils ne posent pas la plupart des problèmes environnementaux associés aux camions et aux trains, tels que la pollution de l'air, le bruit, les embouteillages sur les autoroutes et aux traversées de rail et aux animaux tuants qui se sont égarés sur autoroutes et chemins de fer. Les oléoducs peuvent polluer la terre et les fleuves quand a la fuite ou la rupture se développent. Cependant, beaucoup plus de déversements accidentels se produiraient si les camions et les trains ont transporté du même pétrole.

Chapitre II

Processus de fabrication D'un pipeline

II.1 Introduction

L'industrie est l'outil de développement de chaque pays, son but est la production des biens et de services. Le secteur de l'industrie lourde est choisi pour faire le premier investissement du fait que ce secteur était considéré comme la base de tout développement industriel capable d'assurer notre indépendance économique.

Ce chapitre va expliquer l'industrie des pipelines dans l'entreprise **I Métal**, et exactement dans l'unité **ALFAPIPE**. Pour ensuite expliquer les étapes de l'usinage des tubes soudés en spirale est enroulée à l'aide d'une tôle en forme de spirale, qui nous permet d'obtenir un tube assemblé par un cordon de soudure de l'intérieur et de l'extérieur de la paroi. Cette technique demande de la préparation de la tôle et un réglage de la machine avec une grande précision afin d'obtenir un tube droit. Les pipes sont très employées pour le transport des fluides de longue distance << pipeline >> et l'assainissement en eau dans les villes. Pour cette raison ces pipes doivent être construites avec une qualité supérieure en tenant comptes de tous les exigences techniques du cahier de charge.

II.2 Présentation du lieu de fabrication d'un pipeline d'hydrocarbures

ALFAPIPE est une entreprise spécialisée dans la fabrication des tubes pour canalisations d'hydrocarbures et d'hydrauliques. Elle dispose d'un système management qualité assurant la conformité du produit selon les normes internationales API et ISO9001 depuis 2000.

Située à 6 Km de Ghardaïa ALFAPIPE est spécialisée dans la fabrication de tubes soudés en spirale destinés pour l'industrie des hydrocarbures (gaz et pétrole) et leurs revêtements (extérieur et intérieur).

ALFAPIPE a pour rôle de produire des tubes soudés en spirale à partir des bobines de tôles. La gamme de tubes fabriqués varie en diamètre entre 16 pouces (406.4 mm), et 52 pouces (1320.8 mm). Actuellement, la plupart des commandes concerne des tubes 48 pouces (1219.2 mm) et de longueur entre 9 à 12 m. Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes API 5L et NFA 49150. La production des canalisations soudées est soumise à plusieurs exigences.

Conformément aux spécifications, les tubes sont fabriqués par soudage automatique à l'arc immergé à partir de feuillards. Le métal devra être de bonne qualité notamment en ce qui concerne sa résistance au vieillissement. La qualité du matériau importé sous forme de bobine est vérifiée dans un laboratoire qualifié.

Actuellement, cette unité a :

- ✓ Une prestation de qualité : un tube revêtu livré sur site pour éviter les aléas de manutention et de stockage intermédiaire;

- ✓ Un partenariat actif avec SONATRACH et les compagnies étrangères associées (Thyssen crupp, Arcelor, Lincoln...etc.).
- ✓ Une ferme volonté de conforter sa place de leader de production de tubes par la recherche de nouvelles formes d'association et par le renforcement de son processus de modernisation.

Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes API 5L et NFA 49150, La soudure des bords est faite en automatique à l'arc émergé sous flux, l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur.

II.3 Aciers à haute limite d'élasticité

II.3.1 Introduction

Le laminage à chaud est une technique puissante de mise en forme dont les applications sont très variées. Une grande majorité des matériaux métalliques est soumise à un formage par laminage au cours de son cycle de fabrication. Bien que le mot laminage évoque plus spécifiquement les produits plats, de nombreux autres procédés de laminage sont utilisés pour obtenir d'autres géométries (fils, ronds, barres, tubes, rails, etc.). [7]

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

II.3.2 Influence de la composition chimique

Les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) sont des aciers micro-alliés au niobium, au vanadium, et au titane. Les autres éléments principaux entrant dans la composition chimique de ces aciers sont : le carbone, le manganèse, l'aluminium, le silicium, et le molybdène.

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

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

II.3.3 Propriétés mécaniques des aciers X70

Le tableau ci-dessous donne quelques caractéristiques mécaniques de l'acier X70 utilisé au niveau de l'unité ALFAPIPE.

Tableau II.1. Caractéristiques mécanique de l'X70 selon l'API5L.

Caractéristiques API5L	Epaisseur (mm)	R _e (MPa)	R _m (MPa)	A(%)	R _e /R _m
X70	5-25	485-605	570-605	≥ 18	0.90

Avec :

- R_e : limite d'élasticité.
- R_m : résistance à la traction.
- A% : pourcentage d'allongement après rupture.

II.3.4 Propriétés métallurgiques (Composition chimique)

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

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

La composition chimique est détaillée au (tableau II.2). [4]

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

Elément	C	SI	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu
Valeur	0.085	0.312	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	C_{eq}	/
Valeur	0.053	0.007	0.063	0.003	0.0604	0.001	97.8	-	0.0073	0.36	/

II.3.5 Avantage des aciers HLE

- ✓ Ils combinent soudabilité améliorée due au très faible niveau de carbone et bonne formabilité, leurs caractéristiques mécaniques facilitent le formage sur presses et sur lignes automatisées.
- ✓ Ils se caractérisent de plus par une bonne tenue à la fatigue et à la résistance au choc.

- ✓ Grâce à leur limite élastique élevée (R_e), ils sont particulièrement adaptés lorsqu'une réduction de poids et recherchée, c'est pourquoi ces aciers s'utilisent fréquemment en remplacement des aciers de construction.

II.3.6 Laminage à chaud des aciers HLE

Le laminage à chaud s'impose pour deux raisons capitales [Bataille, 2003] et [Mont mitonnet ,2002]: la première est que la résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température. La seconde est d'ordre métallurgique. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal.

Le laminage ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid.

En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du produit. Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface.[9]

Les cages des laminoirs sont généralement « quarto », composées de deux cylindres de travail de faible diamètre (de l'ordre de 10 cm), assurant le laminage, et de deux cylindres d'appui de diamètre plus grand, de la cage (vis de serrage, vérins, etc.) permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise.

Le laminage à froid est généralement réalisé sur laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction et contre traction de la bande. Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage.

A froid, un traitement thermique peut être fait pour restaurer la structure et éviter la rupture par endommagement. Au contraire pendant le laminage à chaud, la recristallisation dynamique s'effectue au cours de la déformation tant que la température du produit le permet Le laminage à froid n'est nécessaire généralement que pour obtenir des tolérances serrées, et un bon état de surface. D'un point de vue pratique, la différence entre le procédé à chaud et le procédé à froid tient donc surtout à la différence des géométries des produits qu'ils traitent. En l'occurrence, plus épais pour les laminages à chaud et plus minces pour les laminages à froid. [10]

II.3.7 Bobinage

En sidérurgie, le coil (mot anglais) est une bobine de tôle issue du laminage à chaud. On désigne occasionnellement ainsi les tôles laminées à froid, mais le terme « bobine » est plus fréquent.

Issu du laminage à chaud, il s'agit donc d'un demi-produit pour la sidérurgie, lui-même issu des brames.

Les colis ont un poids moyen de 12 tonnes, mais peuvent dépasser les 25 tonnes avec, généralement, une largeur de 1 250 à 2 000 mm. L'épaisseur de la tôle bobinée va de 2 à 6 mm. L'intérêt de grosses bobines pour l'industrie de la transformation est lié à la manutention et aux temps de mise en place et de réglage. Pareillement, le sidérurgiste essaie généralement de laminier le plus fin possible pour améliorer la ajoutée de son produit et, si possible, éviter l'étape du suivante du laminage à froid.

Généralement, les colis à chaud sont laminés à froid pour obtenir l'épaisseur finale requise. Ce laminage est précédé d'une étape de décapage, pour enlever la couche de calamine qui s'est déposée sur la tôle pendant le laminage à chaud.

Les coils sont aussi transformés sur des installations de parachèvement du sidérurgiste, ou chez de gros transformateurs très proches de la sidérurgie, et destinés soit :

- ✓ Au découpage en feuilles
- ✓ Au refendage (cisailage dans le sens de la longueur et reformation de bobines de faible largeur, les feuillards)
 - ✓ À la fabrication de profilés reconstitués soudés (poutrelles, cornières, tés, tubes etc.)
 - ✓ À l'emboutissage (jante d'automobile, bouteilles de gaz, etc.)

On emploie aussi le terme de coil pour les bobines de fil machine à chaud comme à froid mais surtout pour les produits en provenance ou à destination de l'étranger. En France, on préfère le terme de « couronnes » s'il s'agit de fil machine ou de bobines tronçonnées, si le produit a subi une première transformation et qu'il a été rebobiné à spires jointives.^[11]



Fig. II.1: Bobine[21]

II.4 Soudage

II.4.1 Généralité sur le soudage

Le soudage est un moyen d'assemblage permanent. Il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. En dehors du cas idéal où les forces interatomiques et la diffusion assurent lentement le soudage des pièces métalliques mises entièrement en contact suivant des surfaces parfaitement compatibles et exemptes de toute pollution, il est nécessaire de faire intervenir une énergie d'activation pour réaliser rapidement la continuité recherchée.

L'opération peut être appliquée aux métaux ainsi qu'aux thermoplastiques (voir soudage plastique) et au bois (voir soudage du bois). Le soudage permet d'obtenir une continuité de la nature des matériaux assemblés : matériau métallique, matière plastique, etc. De ce fait, les techniques d'assemblage mécaniques (rivetage, boulonnage, agrafage...) ou par adhésion (collage), ainsi que les techniques de brasage ne répondent pas à la définition du soudage.[8]:

II.4.2 Zone Affectée Thermiquement (ZAT)

Afin d'anticiper et de maîtriser les évènements métallurgiques en soudage, il est important d'établir les conditions thermiques produites par une source de chaleur concentrée telle qu'utilisée en soudage au sein et aux abords des soudures telles que :

Les températures maximums atteintes tout au long de la Zone Affectée par la Chaleur (ZAC) ou Zone Affectée Thermiquement (ZAT), les vitesses de refroidissement en métal fondu et en ZAT, ainsi que l'ordre de grandeur des vitesses de solidification du bain de fusion.

L'étude et la connaissance de l'écoulement thermique sont prépondérants quant au développement et à la mise au point des modes opératoires établis pour satisfaire les exigences d'un cahier des charges et compte tenu du comportement métallurgique d'un matériau donné

Dans ce qui suit, l'expression "joint soudé" est utilisée pour désigner à la fois le métal fondu, la ligne de fusion (FL), la zone thermiquement affectée et le métal de base.

En soudage l'impact de la chaleur est bref et local se déplaçant de proche en proche au rythme de la progression de la soudure. Les évènements thermiques survenus dans un joint soudé peuvent être mis en évidence sur prélèvement poli et attaqué avec un réactif approprié. Dans le cas des aciers courants, l'un des réactifs les plus utilisés est le nital ; un mélange soigneusement dosé d'alcool (90 à 95%) et d'acide nitrique.[8]

II.4.3 Différents types de soudage

- ✓ Soudage à la flamme
- ✓ Soudage aluminothermique
- ✓ Soudage électrique par résistance
- ✓ Soudage à l'arc électrique avec électrodes enrobées
- ✓ Soudage par friction
- ✓ Soudage par friction malaxage ou soudage thixotropique
- ✓ Soudage à l'arc sous flux
- ✓ Soudage hybride
- ✓ Soudage électro gaz
- ✓ Soudage par diffusion
- ✓ Soudage par ultrason

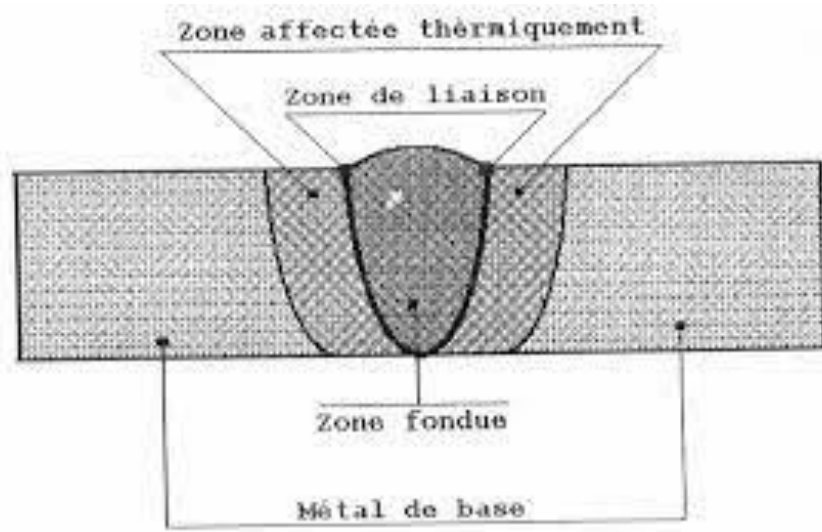


Fig. II .2: Les différentes zones de soudure[21]

II.4.4 Défauts de soudure

Il existe une grande variété de défauts caractérisés par leur nature (solide, gazeuse) leur forme et par leur origine. Lors du contrôle, la distinction entre différents types de défauts se relève cruciale car elle permet souvent d'estimer les risques de fracture de matériau.

Un « défaut » est une anomalie de la matière risquant de provoquer « la ruine » de l'ensemble soudé.

En soudage « un défaut » : discontinuité dans la soudure ou écart par rapport à la géométrie volume.[8]

II.4.5 Principaux défauts de soudure

La classification des défauts de soudure conformément à la norme NF EN 26250.

- a. Groupe 1 : Fissures.
- b. Groupe 2 : Cavités.
- c. Groupe 3 : Inclusion solide.
- d. Groupe 4 : Manque de fusion / Manque de pénétration.
- e. Groupe 5 : Défauts de forme.

II.5 Processus de la fabrication

II.5.1 Introduction

Les tubes sont obtenues à partir des bobines laminés à chaud de tonnage 10 à 30 tonnes et d'une largeur 600 à 1800 mm, selon le diamètre du tube.

Les bobines sont déroulées planées, et formées en hélice puis soudées à l'arc immergé sous flux en deux passes successives sur une même machine dite machine à souder en spirale.

La qualité des tubes soudés en spirale fabriquer par ALFA PIPE est basé sur le contrôle dès la réception de la matière première (bobine) jusqu'au produit fini (tube) en suivant la norme Américaine API 5L, en passant par plusieurs étape de contrôle. [1]

La technologie de fabrication des pipelines est construite en fonction de l'objectif et de type de pipeline.la méthode la plus courante est : la fabrication de canalisation par soudage.

La multiplicité des diamètres et des épaisseurs de tubes et le développement avec le temps de leurs techniques de fabrication [1], constituent les raisons de la diversité du réseau de transport gazier algérien. On retrouve :

- les tubes soudés sous la forme en spirale
- Les tubes soudés sous forme longitudinale
- Les tubes formés sans soudure

II.5.2 Tubes soudés sous la forme en spirale

Les procédures de fabrication des tubes soudés en spirale sont faites par cintrage de bande de feuilles d'acier de la forme d'un tuyau et la soudure ensemble, cette technique de production passe par des étapes, comme l'indique la figure II.1. Le soudage se produit ici sur la production de tubes en spirale qui sont généralement fournis.

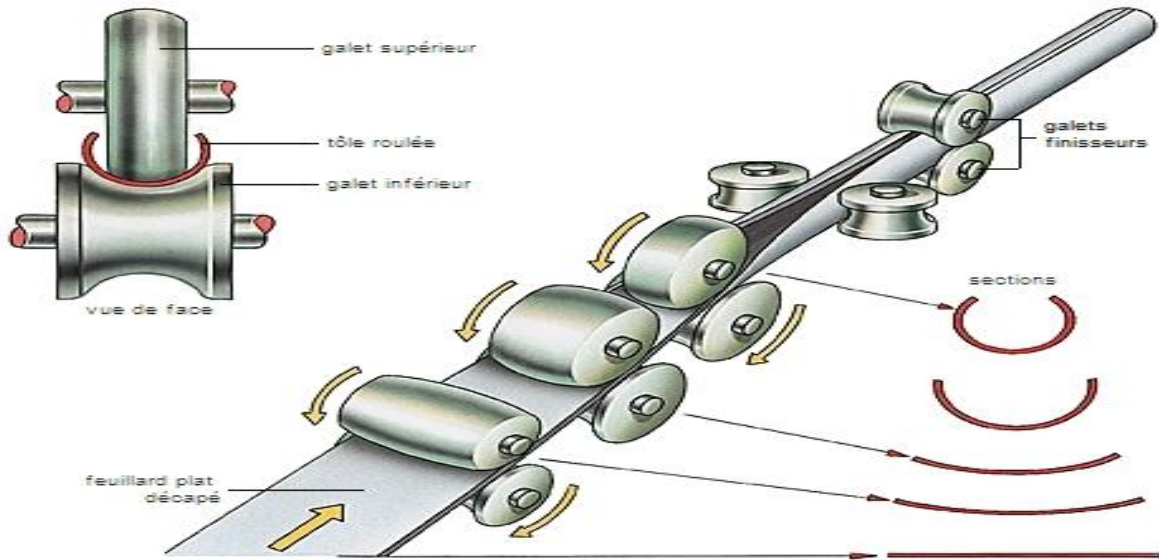


Fig.II.3: Les tubes soudés sous la forme en spirale[21]

Le formage du tube en spirale se fait avec inclinaison de l'angle d'introduction de la bande qui se calcule par la relation suivante:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{B}{\pi D_{ext}}\right) \quad (1)$$

Avec :

B : la largeur de bande .

D_{ext} : le diamètre extérieur de tube forme

β : l'angle d'introduction de la bande par rapport au l'axe cimétrique(Δ)

Pratiquement, c'est très difficile de fabriquer les tubes avec un petit angle aigu, si pour cela, que les valeurs de l'angle se limitent entre 15° et 50°.

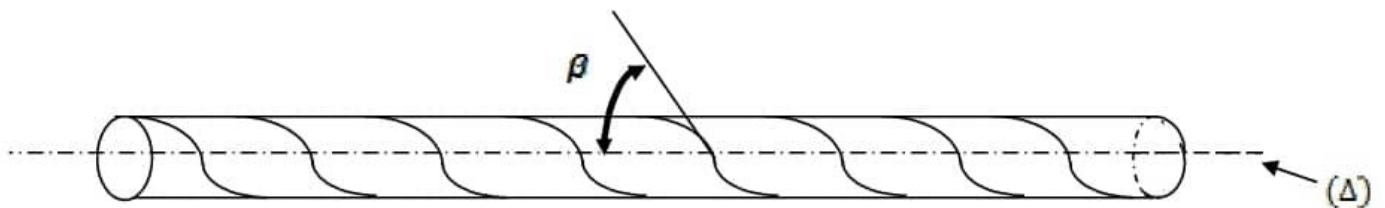


Fig. II.4: Angle d'introduction de la bande

Les machines de l'unité ALPHAPIPE peuvent traiter des aciers laminés à chaud à très hautes limites d'élasticité dans les nuances X60 à X70. Les bobines utilisées pour la fabrication des tubes spirale sont livrées brutes, ces approvisionnement proviennent principalement de l'Allemagne ou la France. Les bobines utilisées peuvent avoir une épaisseur de 5 à 15 mm, une largeur de 1250 à 2000 mm, un poids compris entre 29 et 36 tonnes. Cette unité est conçue pour la transformation à froid des bobines de tôle en tubes soudés en spirales et elle est équipée de :

II.5.3 Zone fabrication

A ce niveau la fabrication des tubes spiral :

II.5.3.1 Basculeur de bobines

Les bobines de tôle arrivant à axe vertical sont mises à axe horizontal sur cette installation pour pouvoir être préparées.



Fig. II.6 : basculeur de bobine[21]

II.5.3.2 Machine de préparation bobine

Cette machine est alimentée en bobines à axe horizontal par le pont roulant. La bobine ainsi placée et déroulée sur une certaine longueur pour subir plusieurs opérations. La première partie de la bobine est coupée d'équerre suivant l'axe de la bande et elle est soumise à :

- ✓ Un contrôle dimensionnel (épaisseur, criques,...etc.)
- ✓ Un contrôle visuel (empreintes, criques,...etc.)
- ✓ Un contrôle ultrasonique pour détecter les éventuels défauts interne (des doublures).

Si le début de la bande ne présente pas des défauts, on considère que la bobine est apte à être consommée. Dans le cas où le début de la bobine contient des défauts, la bobine sera refusée.



Fig. II.6 . Machine de préparation bobine[21]

II.5.3.3 Machine à souder

La TUBERIE spirale dispose de quatre (04) machines à soudes identiques, qui permettent la réalisation de plusieurs opérations pour la fabrication du tube.



Fig.II.7: Machine à souder de pipe[21]

II.5.3.4 Rabotage

C'est une opération d'oxycoupage qui consiste à débiter la fin de la bande sur la machine et de raccorder le bout de la précédente bobine à la nouvelle par un soudage automatique sous flux. La durée de l'opération dure environ 30 min et nécessite l'arrêt de la production. [5]

II.5.3.5 Guidage

Quatre (04) galets de guidage à commande hydraulique permettent un réglage rapide de la bande en cas de dérives dues aux variations de largeur bande. [5]

II.5.3.6 Dressage bande

Un train de rouleaux dresseurs assurent une parfaite planéité et contribuent au guidage de la bande. [5]

II.5.3.7 Cisailage

Des cisailles de rive permettant la mise en largeur définitive de la bande. Les chutes ainsi obtenues par cisailage sont coupées par simple rotation de deux (02) tourteaux hacheurs équipés de plusieurs couteaux en acier. [5]

II.5.3.8 Formage de la bande

La bande est entraînée par deux (02) rouleaux cylindriques, elle subit un préformage par des galets cambreurs, des bras de guidage avec plaque d'usure en TEFLON maintiennent la bande. Celle-ci est introduite dans la cage de formage constituée de plusieurs trains de galets, ajustés suivant le diamètre à réaliser. La bande ainsi formée, est soudée intérieurement, puis une demi-spire après extérieurement. Le procédé utilisé est le soudage automatique à arc immergé sous flux ; une centrale permet de récupération de flux en excès pour le recycler. Le tube formé est coupé à la longueur voulue par un chariot d'oxycoupage prévu à cet effet. [5]

II.5.3.9 Deux machines nettoyage tubes

Le tube ainsi mis en longueur est nettoyé sur une machine qui le débarrasse de tous les déchets (flux, laitier....etc.).

II.5.4 Zone visuelle

A ce niveau, les opérations suivantes sont réalisées :

- Contrôle de l'aspect visuel de la tôle et du cordon.
- Contrôle dimensionnel (longueur, diamètre, épaisseur).

- Élimination par meulage de certains types de défauts.
- Transcription de ces informations sur la carte suiveuse du tube.
- (Signalisation des opérations qui sont réalisé sur le tube).

II.5.5 Revêtement des tubes

On utilise généralement la technique classique des trois couches et du Fusion-Bonded Epoxy (FBE) pour l'isolation extérieure. Nous utilisons aussi bien de la polyoléfine que du polyéthylène (PE) et du polypropylène (PP). L'objectif principal est de protéger le tube par le processus de Revêtement de la corrosion interne et externe. [12]

II.5.5.1 Revêtement extérieur

II.5.5.1.1 Revêtement Fusion Bonded Epoxy (FBE) : Les revêtements FBE constituent des couches de résine durcissant thermoplastiques, qui sont apposées par un procédé thermostatique sur les tubes d'acier et les protègent de la corrosion. Le FBE peut être utilisé à des températures d'exploitation allant jusqu'à 110 degrés C, l'épaisseur typique est comprise entre 350 et 450 micromètres. Une deuxième couche entraîne une excellente résistance aux détériorations du pipeline, même dans les conditions environnementales les plus difficiles. [12]

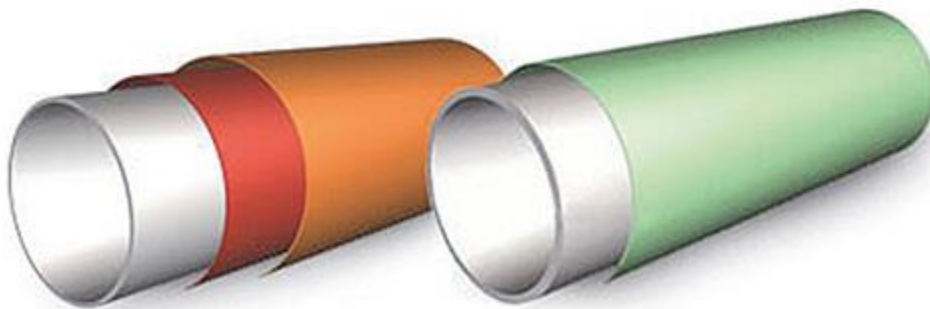


Fig. II.8 : Revêtement FBE[21]

II.5.5.1.2 Revêtement extérieur polyoléfine 3 couches

Le revêtement polyoléfine 3 couches est une combinaison de résine thermoplastique durcissant, de couche d'adhérence copolymère et de thermoplastique apposée sur les tubes d'acier afin de garantir leur protection contre la corrosion et les détériorations mécaniques, figure .Les domaines d'application sont principalement :

les canalisations enterrées ou posée en surface, et les canalisations émergées en eau douce ou salée. Le revêtement est constitué de [12]:

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

Les avantages de revêtement extérieur en polyéthylène se caractérisent par une grande inertie chimique, une excellente adhérence de revêtement sur l'acier, un apport au réseau d'une résistance fiable vis-à-vis des sols agressifs et des courants vagabonds.

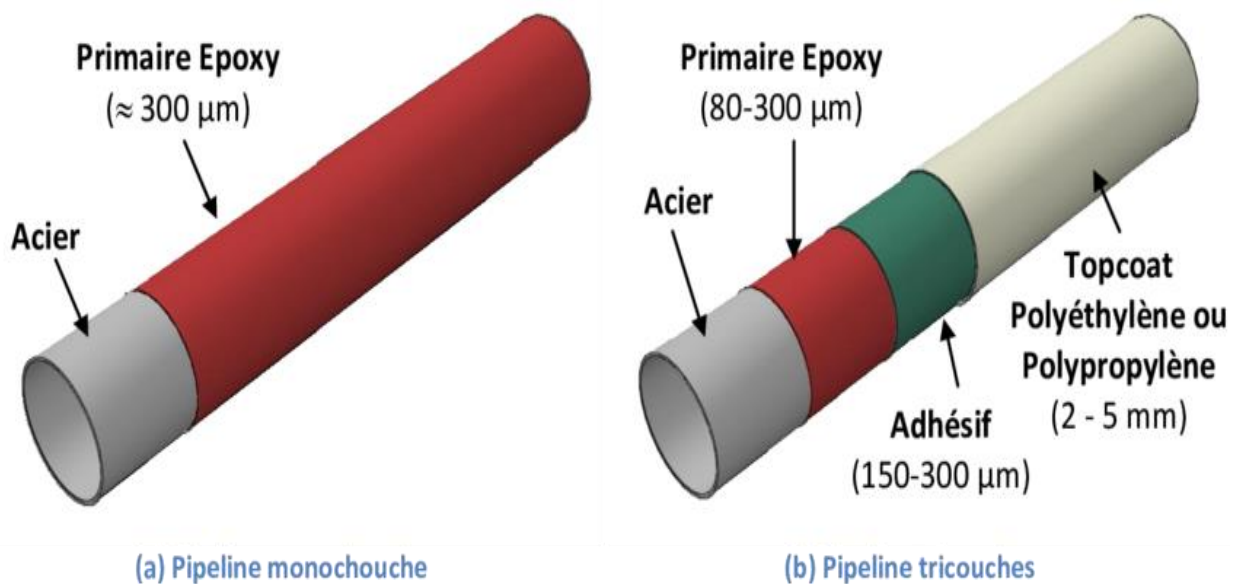


Fig. II.9 : Revêtement extérieur[21]

II.5.5.2 Revêtement intérieur

II.5.5.2.1 Revêtements pour l'amélioration du débit

Une résine époxy liquide est pulvérisée sur la paroi interne des tubes dans une épaisseur typique de 60 à 100 micromètres. Il en résulte une amélioration de la capacité de transport du gaz, une minimisation des résistances de friction et donc une réduction des stations décompresseurs. La simplification du nettoyage et la protection

temporaire contre la corrosion font du revêtement Flow Cotinga une solution unique et économique pour le transport de gaz. [12]

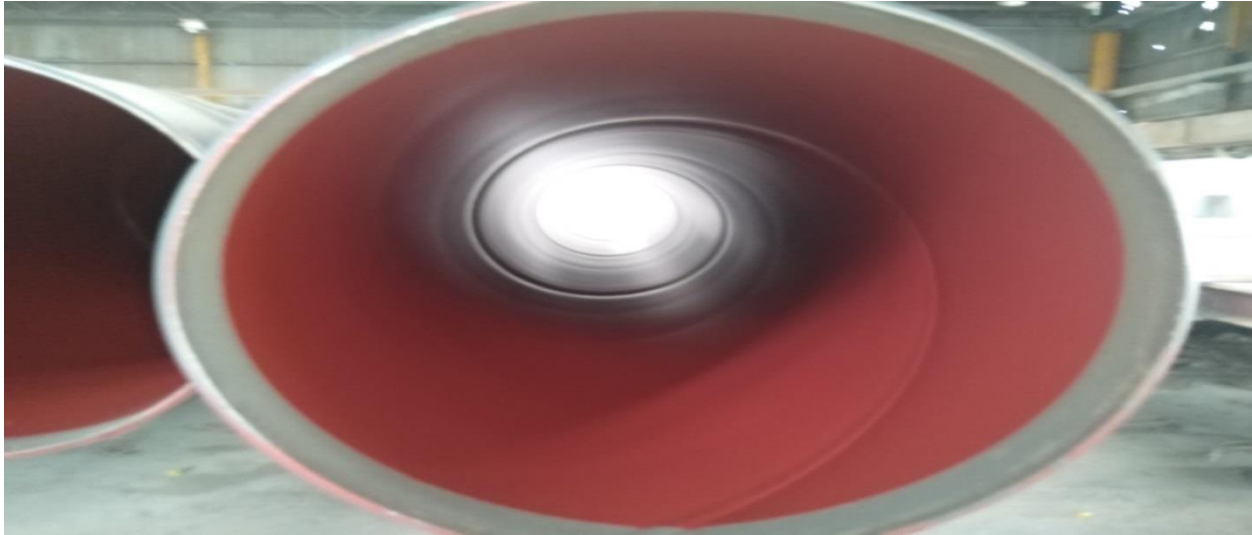


Fig. II.10 : Revêtements intérieur en résine époxy liquide pour les pipelines

Une résine époxy liquide est pulvérisée sur la paroi interne des tubes dans une épaisseur de 400 à 500 micromètres. Pour ce faire, nous utilisons une nouvelle génération de résines époxy sans solvants. Un objectif permanent de l'exploitation des pipelines est d'assurer des transports massifs d'hydrocarbures dans le respect de l'Environnement et de la Sécurité. Cet objectif est atteint par la mise en œuvre de plan de surveillance et de maintenance qui est destiné à maintenir l'intégrité des lignes et éviter toute perte de confinement. La présentation expose les risques auxquels sont soumis les pipelines et les mesures qui sont mises en œuvre pour y répondre. [12]

II.5.6 Contrôle de qualité

Tout assemblage soudé doit offrir des garanties optimales de sécurité et d'endurance aux conditions de service. La qualité de l'assemblage prend ses racines à divers stades de la construction, Avant, pendant, et après fabrication. En soudage, où les facteurs régissant la qualité des assemblages sont nombreux et complexes, il y a lieu de prévoir trois types de contrôles distincts, en fonction du stade d'intervention :

- ✓ Contrôle Avant soudage ;

- ✓ Contrôle pendant soudage ;
- ✓ Contrôle après soudage :
- ✓ Contrôles destructifs.
- ✓ Contrôle semi destructifs.
- ✓ Contrôles non destructifs.

II.5.7 Contrôle non destructif (CND)

L'objectif des contrôles non destructif (CND) est donc la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné. C'est pourquoi le recours aux CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits et de la gestion des risques, assurant ainsi la sécurité des personnes et des biens. Il comporte un contrôle des bobines à la réception, et le contrôle des tubes pour valider la conformité des tubes. Ce dernier se déroule selon les étapes suivantes [13]:

II.5.7.1 Contrôles visuels

L'examen visuel est le plus simple et le premier des contrôles devant être mise en œuvre. Il permet de déceler les défauts de formes aux autres défauts débouchant en surface des joints soudés. L'inspection est faite sous un niveau d'éclairage d'au moins de 350 lux. L'évaluation métrologique des tubes soudés à l'arc sous flux en poudre comporte les paramètres suivants [13]:

Tableau II.3: Paramètre de contrôle visuel.

PARAMETRE	METHODE DE MESURE
Diamètre (mm)	Micromètre (ruban gradué)
Épaisseur 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

Remarque : la masse de tube balance (kg).



Fig. II.11 : Contrôle visuel. [21]

Pour la traçabilité un dossier film est instauré pour chaque tube. Les contrôles par radiographie sont confiés à un personnel certifié niveau2 (COFREIND niveau2).

II.5.7.2 Contrôle par radioscopie

Domaine d'application de la Radioscopie

Ce contrôle est basé sur l'absorption différentielle du rayonnement X ou gamma. Les différences de rayonnement émergent de la pièce engendrent sur le film une « image latente » qui sera ensuite révélée par voie chimique. [5]

Le contrôle radiographique des soudures est effectué dans deux chambres a rayon X. le cordon de soudure est visualisé en totalité par radioscope. Toute fois le repérage de défaut est sanctionné par une prise de clichés.

Un marquage indélébile repère l'endroit du défaut. Le contrôle des réparations et des indications de l'ultrason ainsi que les extrémités des tubes est réalisé au niveau de la chambre à radiographie.[13]

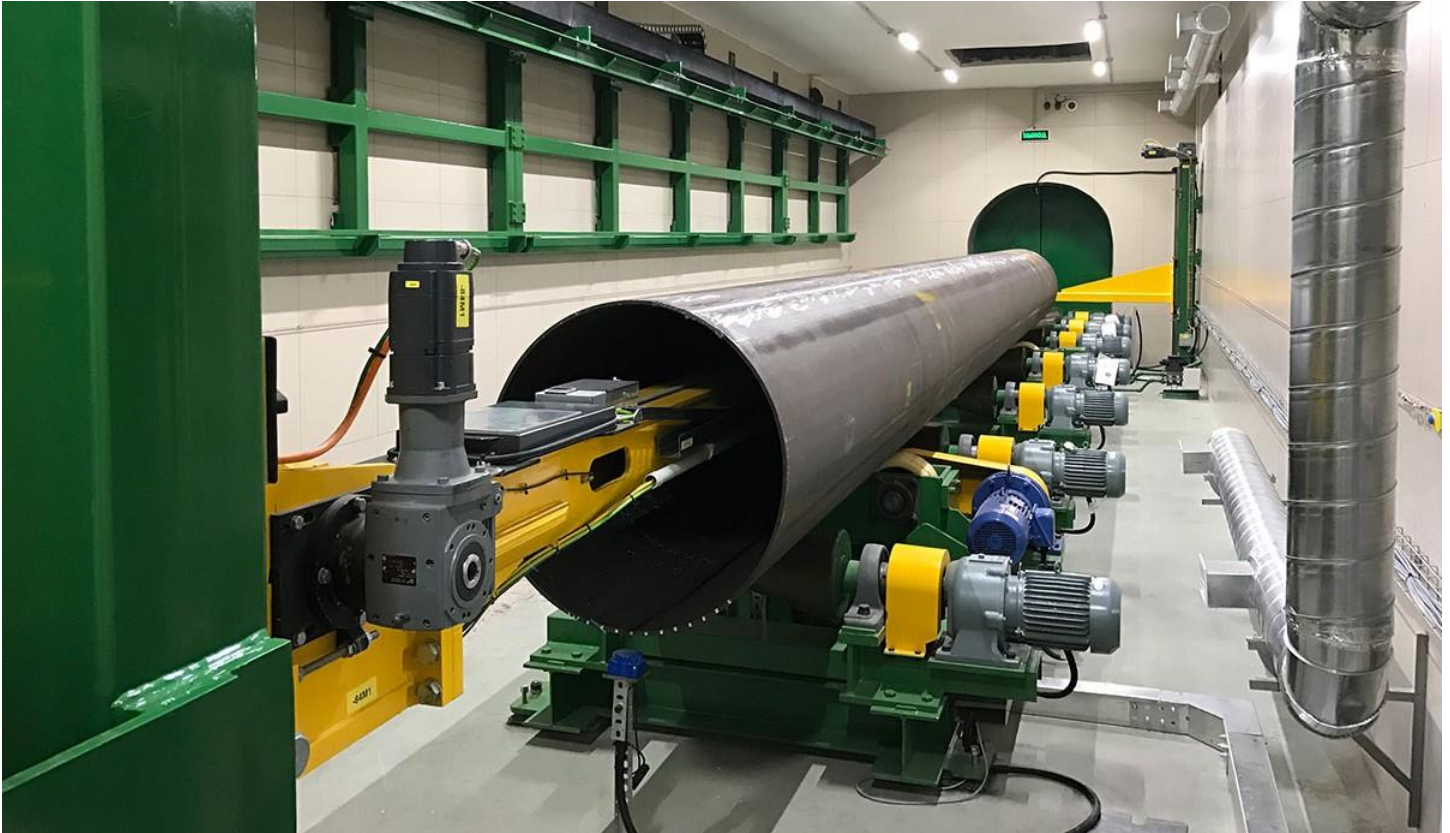


Fig. II.12 : Control radioscopie[21]

II.5.7.3 Control par hydrostatique

Chaque tube subit l'épreuve hydrostatique au niveau de l'installation relative à ce test (banc d'épreuve hydrostatique) avant tout test non destructif final.

Les tubes sont testés à 90% de leur limite élastique selon API 5L et la spécification du client, en respectant la réglementation algérienne (DDP). Chaque tube doit être maintenu à la pression d'essai à 118 bars pendant au moins 15 secondes. Les étapes de l'épreuve sont enregistrées automatiquement à l'aide des courbes.[13]



Fig. II.13 : Control hydrostatique.

Le contrôle par ultrasons est réalisé sur le cordon de soudure, le métal de base et les extrémités du tube afin de détecter tout défaut. Les résultats du contrôle sont enregistrés automatiquement sur PC et imprimé sur papier (rapport Ultrason ou numéro du tube y est reporté ; les indications des défauts sont affichées d'une manière acoustique et optique). 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.[13]



Fig. II.14 : Control par ultrasons[21]

II.5.7.5 Contrôle final

C'est un contrôle visuel dimensionnel qui consiste en un contrôle interne et externe de chaque tube en contrôlant les renseignements mentionnés sur la carte tube. Le tube est alors réceptionné ou classé, un numéro séquentiel lui sera attribué. Le contrôleur final veille au marquage des tubes selon la procédure en cours.[13]

II.6 Essais utilisés pour la caractérisation

II.6.1 Contrôle destructif

II.6.1.1 Introduction

Les contrôles destructifs des tubes soudés en spiral viennent consolider la qualité du produit fabriqué par ALFAPIPE. Son laboratoire d'essais mécaniques dispose d'équipements fiables étalonnés périodiquement. Les différents essais destructifs réalisés sur un anneau de tube sont des essais mécaniques (analyse chimique, dureté, résilience, traction, pliage).

II.6.1.2 Prélèvement des échantillons

Les échantillons pour les essais destructifs sont prélevés d'un anneau du tube obturé à l'une des extrémités, désigné pour le test (lot ou coulée). La paire de plaques (métal de base, métal de base soudé) sont prélevés transversalement à l'axe du tube.

II.6.2 Essais utilisés

Les méthodes expérimentales sont axées sur une caractérisation du comportement mécanique et à la rupture de l'acier API 5L X70 utilisé dans le transport du gaz. Nous avons commencé par une étude générale des propriétés mécaniques et microstructurales de cet acier, suivie d'une description des éprouvettes et du dispositif expérimental ayant permis de mener des essais sur des éprouvettes normalisées de traction. Une étude de résilience et de dureté a été aussi faite. Enfin, des essais de pliage, suivant différents chargements, est présenté avec une validation numérique.

II.6.3 Analyse chimique

II.6.3.1 Introduction

Le contrôle de la composition chimique se fait sur le métal de base. Les résultats d'analyses sont comparés avec celle du fournisseur et les exigences du client, ce qui permet de définir les premiers critères d'acceptation du produit en composition chimique et en carbone équivalent (spectromètre à étincelle).

But de travail

Le but de notre travail consiste à suivre l'évolution mécanique, chimique et métallographique d'un acier faiblement allié utilisé pour la fabrication de pipes de grade X70 et qui destiné au transport d'hydrocarbure, cette évolution va concerner le métal de base MB et le matériau avec un joint soudé (ZAT, ZF...) pour mieux évaluer ce comportement.

II.6.3.2 Caractéristiques chimiques

La composition chimique de l'acier utilisé pour la fabrication du tube fourni selon cette spécification devra satisfaire aux exigences de la norme API 5L. Tel que montré dans le tableau II.4, nous remarquons que ce matériau est un acier faiblement allié.

Tableau II.4 : Composition chimique X70.

Eléments	L'indice	Valeurs max (%)
Carbone	C	0.12
Manganèse	Mn	1.70
Silicium	Si	0.45
Aluminium	AL	0.06
Niobium	Nb	0.06
Vanadium	V	0.10
Titane	Ti	0.06
Nickel	Ni	0.30
Cuivre	Cu	0.25
Chrome	Cr	0.30
Molybdène	Mo	0.10
Soufre	S	0.015
Phosphore	P	0.025
Azote	N	0.012
Calcium	Ca	0.006



Fig. II.15 : Machine d'analyse chimique

II.6.3.3 Carbone équivalent de l'acier

Le carbone équivalent (C_{eq}) d'un acier (matériau de base ou de la soudure) renseigne sur certain aspect et son comportement, notamment en ce qui concerne son aptitude à la trempe et le risque de criquage du la présence d'hydrogène. Le C_{eq} s'exprimer en pourcentage.

L'acier à C_{eq} élevé risque d'avantage de durcir dans les zones thermiquement affectées des soudures (ZAT) réaliser et est plus sujet au criquage dû à la présence d'hydrogène que l'acier à faible C_{eq} .

L'amplitude à la trempe joue sur la soudabilité ; c'est pourquoi il est plus difficile de réussir le soudage d'acier C_{eq} élevé.

Le C_{eq} est influence par les éléments d'alliage de l'acier. Diverses formules permettent de calculer le C_{eq} , la formule utilisée étant par le type d'acier et les aspects particuliers et importants du comportement. Le C_{eq} de

l'acier modérément allié, en ce qui concerne son aptitude à la trempe et son risque de criquage dû à l'hydrogène, se calcule souvent grâce à la formule de l'International Institute of Welding.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo+V+Cr}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (2)$$

Le carbone et le manganèse ont l'impact le plus important sur la valeur du C_{eq} en ce qui concerne les aciers modérément alliés. C'est pourquoi pour les calculs d'ordre général, la formule peut parfois être raccourcie :

Le C_{eq} pour le tube et les soudures correspondantes est en principe inférieure à 0,4%.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} \quad (3)$$

II.6.4 Essais de dureté

II.6.4.1 Généralités

La dureté d'un matériau est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un corps plus dur. Les essais de dureté sont particulièrement utilisés pour caractériser les matériaux métalliques, car ce sont des essais rapides à effectuer. Ils permettent ainsi de réaliser un contrôle qualité du matériau en ayant une première approche des caractéristiques mécaniques statistiques (résistance, rigidité,...) sans être obligé de réaliser un essai de traction, long et coûteux.

Il existe un grand nombre d'essais possibles, mais on relèvera surtout Brinell, Rockwell, Vickers, très complémentaires. [14]

Les essais de dureté sont également très utilisés pour les matériaux plastiques (moins durs), mais avec d'autres essais que ceux mentionnés ci-dessus, Shore et Barcol, essentiellement. Ces essais ont l'avantage d'être encore plus rapides, mais la précision des mesures est moins bonne.

Quant aux verres et céramiques, ce sont des matériaux trop durs et trop fragiles pour être testés en dureté sous cette forme.

Les valeurs obtenues sont des valeurs comparatives.

Dans le cas des essais Brinell, Rockwell et Vickers le symbole de dureté est respectivement HB, HR, HV.

Dans l'entreprise ALFAPIPE utiliser l'essai dureté **Vickers**.

II.6.4.2 Essais Vickers

L'essai consiste à appliquer dans le matériau un pénétrateur diamant en forme de pyramide à basse carrée, d'angle au sommet 136°, sous l'action d'une charge F maintenue pendant 15 secondes, et à mesurer la diagonale d d'une empreinte après enlèvement de la charge. La dureté Vickers est proportionnelle au rapport F/S. elle s'exprime par un nombre sans unité, HV, suivi de la valeur de la charge, par exemple : 255 HV 30.

$$HV = \frac{2F \left(\frac{\sin 136}{2} \right)}{g \cdot d^2} = \frac{0.189F}{d^2} \quad (4)$$

F : force appliquée (N)

d : valeur moyenne des diagonales de l'empreinte (mm)

g : accélération terrestre (9,80665 m.s-1)

L'intérêt de choisir une pyramide à base carrée comme pénétrateur est que contrairement à l'essai Brinell ou Rockwell, la dureté Vickers est quasiment indépendante de la charge appliquée. Cela permet d'établir une gamme de valeurs très large, allant des plastiques jusqu'aux aciers cémentés.

Pour pouvoir mesurer d, il faut un système optique, il s'agit donc d'une manipulation relativement longue. [15]

L'essai Vickers convient pour les matériaux homogènes de toute dureté, mais est particulièrement utilisé pour les matériaux les plus durs en couche très mince, car la profondeur de l'empreinte est encore plus petite que pour l'essai Rockwell : aciers cémentés, aciers nitrurés...

Il est important d'obtenir, lors de l'essai, d1, et d2 de même ordre de grandeur.



Fig. II.16 : Préparation de l'échantillon. (a) rectification (b) attaque chimique et (c) état finale

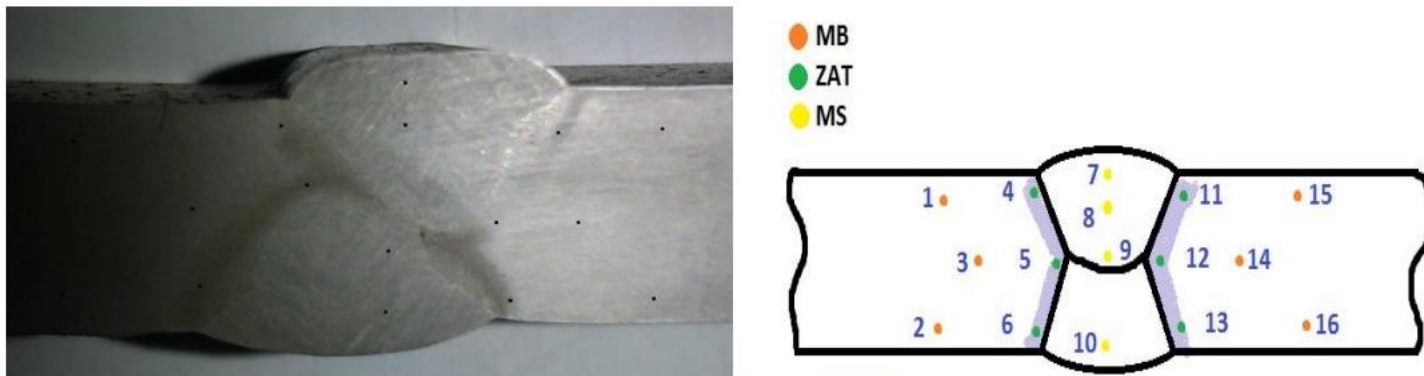


Fig. II.17 : Variation de dureté Vickers dans les trois zones.



Fig. II.18 : Procédure et machine de dureté (Type Vickers).

Les valeurs de micro dureté de ce tube sont acceptables et ne présentent aucune anomalie. Elles sont conformes aux exigences de la norme API. Les filiations de micro dureté ont montré une bonne fluctuation tout au long de l'assemblage soudé (métal de base, cordon et zone affectée thermiquement) pour le tube étudié. Les résultats de micro dureté des indentations 7, 8 et 9, 10 relatives au cordon de soudure ont montré une uniformité des valeurs entre le métal de base et le cordon de soudure, signe d'un soudage correct. Nous avons remarqué que les zones

4, 5, 6, 11, 12, 13 correspondent à une dureté très élevée. Ces zones sont donc les plus fragiles et risquent d'être soumises à rupture.

II.6.5 Essai de traction

Le matériau de notre étude est un acier au carbone-manganèse utilisé pour le transport des hydrocarbures sous une pression de service de 70 bars de dénomination APIX70, est répond à la spécification imposée par la norme API5L. La composition telle qu'elle ressort des analyses sur coulée est conforme aux exigences de la norme indiquées au tableau II.5.

Tableau II.5 : Exigence de la composition chimique pour analyses nuance X70

	C	Mn	Si	Ni	Mo	S	Cu	V	Nb	Al	P
Min	0.050	1.000	0.150							0.010	
Max	0.140	1.700	0.350	0.250	0.250	0.005	0.080	0.080	0.040	0.040	0.020

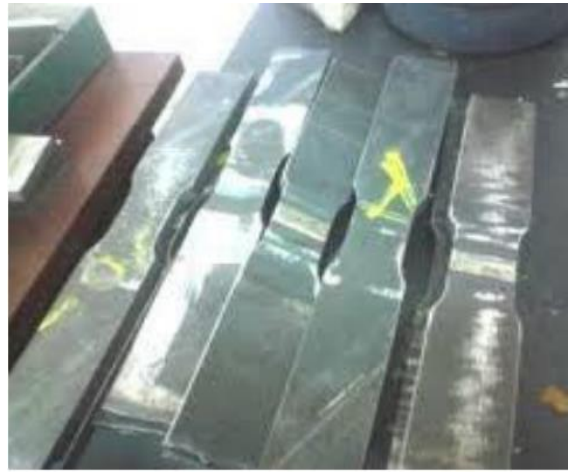
Dans le but de déterminer les courbes charge – déformation et les propriétés mécaniques de l'acier X70, des éprouvettes plates selon, la norme ASTM – A370, ont été utilisés en traction simple à température ambiante dans la machine Mohr (ZAWICK) du laboratoire.

Tableau II.6 : Dimension d'éprouvette (Normalisée).

désignation	Largeur total -L-						
Dimension(mm)	200	60%	50.0 ±0.10	13	40 +3 -6	50	50
Dimension (in)	8	2%	2.000±0.005	%	1% +% -%	2	2



a)



b)



c)

Fig. II.19 : (a) bobine et (b) la virole, (c) éprouvette avec de traction

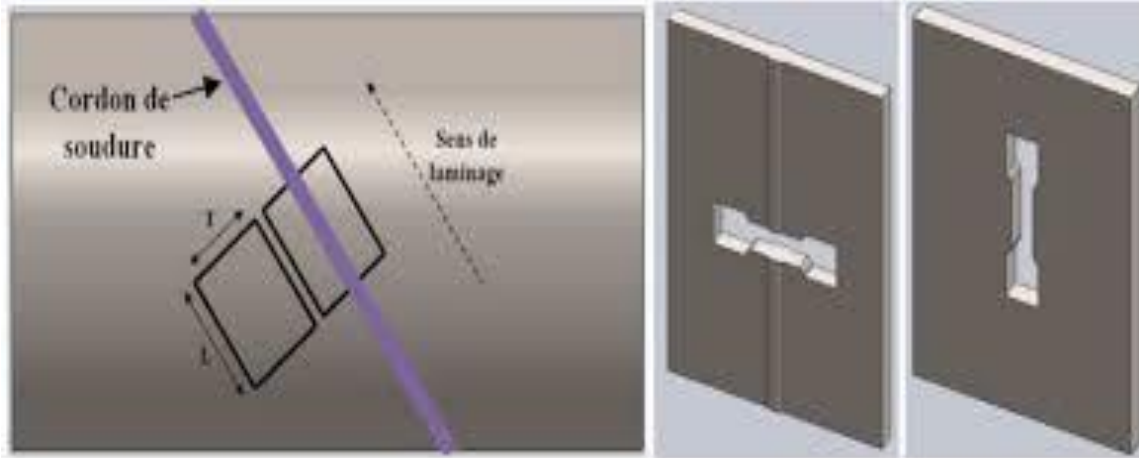


Fig. II .20 :Emplacement des prélèvements des éprouvettes dans le tuyau, Epreuve de traction.

MB.et Epreuve de traction de la soudure. Le prélèvement et le découpage des éprouvettes ont été faits dans le sens du laminage (L) de la bobine, tel que représenter dans la figure **II .20** . Le tableau et la figure présentent les résultats de traction conventionnelle et rationnelle de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation du matériau. L'allure générale de cette courbe a mis en évidence un comportement ductile.

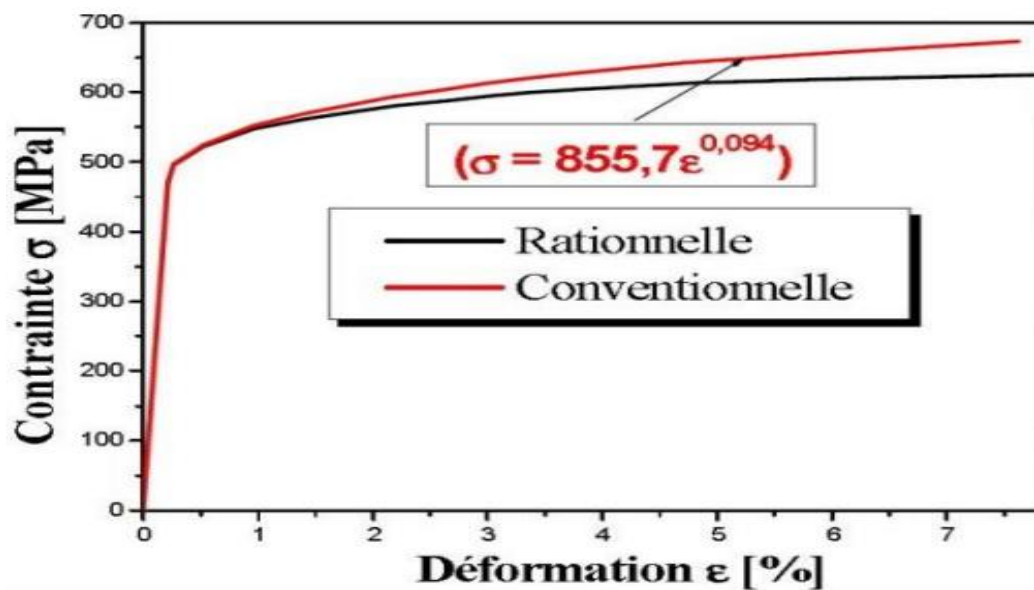


Fig. II .21 : Courbes de traction nominale et vraie.

Tableau II .7 : Propriétés mécaniques de l'acier grade API X70.

E (MPa)	N	σ_E	σ_u	A%	k	n
222.10 ³	0.3	483.03	673.14	40.55	855.70	0.094

Les propriétés mécaniques de résistance à la traction seront conformes aux exigences du tableau **II.7** avec **E** le module de Young, **v** le coefficient de Poisson, **$\sigma_{E0.2}$** la limite élastique selon la norme, **σ_u** la contrainte ultime, **A%** l'allongement à la rupture, et **k** et **n** étant les paramètres de Hollomon. Les rapports de la limite élastique à la charge de rupture pour chaque éprouvette d'essai ne devront pas excéder 0.85.

Tableau II.8 : Propriétés mécaniques limite selon les exigences des clients.

Nuance	$\sigma_{E0.2}$ (mini)	σ_u(mini)	E/R (maxi)	A% (mini)
X70	482.65	565.0.56	0.85	18 %

Les éprouvettes d'essai de traction sur soudure sont prélevées de sorte que l'axe de traction est à 90° de la direction de la soudure, celle-ci se trouve située au centre de l'éprouvette d'essai. Ces éprouvettes ont des épaisseurs égales à l'épaisseur totale du tube. La soudure n'est pas arasée. Les éprouvettes redressées à froid ont été exécutées conformément aux indications de la norme API5L.

II.6.6 Essai de résilience

II.6.6.1 Introduction

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

L'essai de flexion par choc, nommé aussi de résilience, sur éprouvette entaillée Charpy a pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture brutale. [15]

Ces essais ont été effectués sur un mouton Charpy V dont la capacité maximale est de 300J. Nous avons effectué des essais à la température ambiante au laboratoire d'ALFAPIPE. Douze (12) éprouvettes ont été préparées : trois éprouvettes usinés à partir de métal de base (MB), trois autres prisent au niveau du cordant de soudure (MS) et les six dernières éprouvettes prélevées dans la zone affecté thermiquement (ZAT) .

Les dimensions de l'éprouvette sont données dans la FigII.20 ,ainsi que la photographie du pendule de Charpy. La variation d'énergie de rupture (Energie absorbé par l'éprouvette) dans les trois zones est très importante, la valeur moyenne la plus importante est obtenue dans la zone ZAT, suivi de celle du métal de base puis de celle du métal d'apport. [16]



Fig. II .22 : Mouton Charpy (Alpha-Pipe, Ghardaïa)

Il a pour but d'évaluer la résistance à la rupture fragile pour cela il met en œuvre des conditions qui favorisent le comportement fragile.

L'essai de résilience ont été réalisés sur des éprouvettes normalisées CVN 10*10 dont la géométrie selon API5L.

LES éprouvettes ont été prélevées sous angle de 45° par rapport à l'axe de laminage et de trois zones la MB, MS, ZAT.

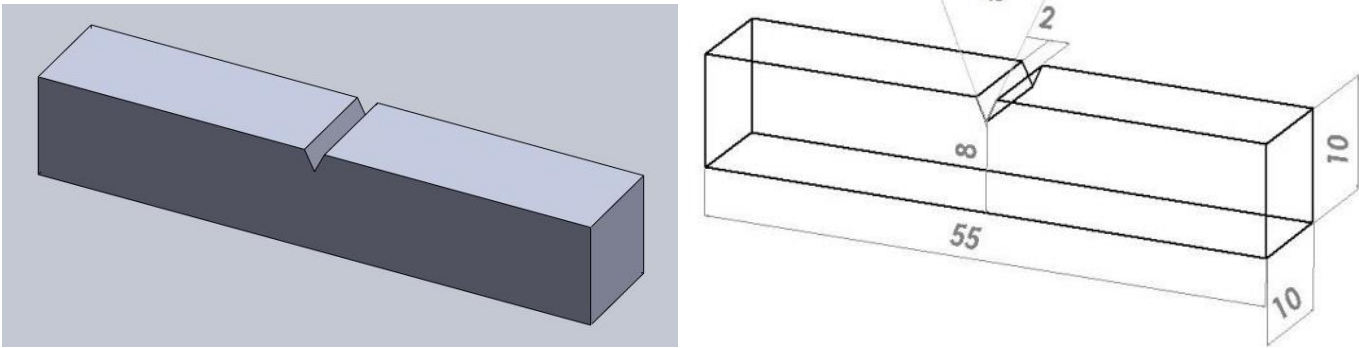


Fig. II .23 : Géométrie et prise de vue de l'éprouvette d'essai de résilience.

II.6.6.2 Principe de l'essai

L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et la fin de l'essai. La machine est munie d'index permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que le pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette.

L'énergie obtenue (en négligeant les frottements) est égale à:

$$K = (m. g. h_i) - (m. g. h_f) \quad (5)$$

m = masse du mouton-pendule [kg]

g = Accélération terrestre. [m·s⁻²] (9,80665)

h_i = hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m]

h_f = hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée [m]

II.6.6.3 Mouton pendule de Charpy

Le mouton pendule Charpy se compose d'un couteau fixé sur un marteau qui oscille dans un plan vertical autour d'un axe. Une partie de l'énergie emmagasinée dans la chute du pendule est utilisée pour rompre l'éprouvette. Le centre de gravité du pendule est toujours très voisin de l'arête du couteau du pendule, Pour exécuter l'essai Charpy, le couteau est écarté de la verticale d'une hauteur h₀ correspondant à une énergie de départ (en général proche de W₀ = 300 joules). On libère le couteau, qui dans sa chute, en passant à la verticale, rompt l'éprouvette. On mesure alors la hauteur h₁ à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée W₁. L'énergie absorbée par l'éprouvette est représentée par la différence W₀ – W₁.

Avec :

$$W_0 = PM \cdot h_i \quad \text{et} \quad W_1 = PM \cdot h_f \quad (6)$$

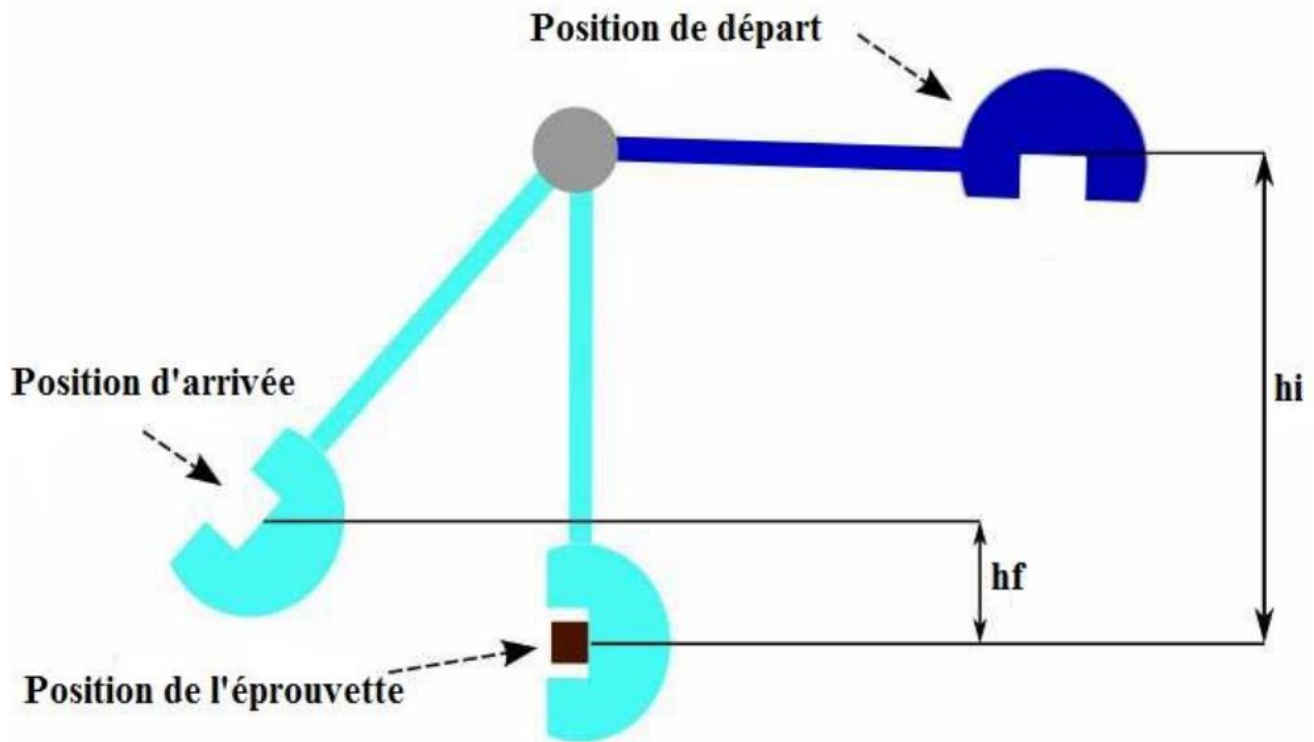


Fig. II .25 : Représentation du mouton pendule de Charpy et hauteurs à prendre en compte pour le calcul de L'énergie absorbée. [21]

II.6.6.4 Corrélation entre l'énergie Charpy et la ténacité

L'utilisation de corrélation entre l'énergie Charpy et la ténacité K_{IC} présent les difficultés suivantes :

- ✓ La singularité de corrélation d'une fissure est de la forme $\frac{1}{\sqrt{r}}$: le pseudo singularité d'une entaille en V avec un angle de 45° est la forme $\frac{1}{r^\alpha}$ ($\alpha = 0.41$ a été calculée à partir de la solution de Williams). [14]
- ✓ L'état de contraint (caractérise par le tri axialité ou le facteur Q) est différent pour une entaille ou une fissure et l'on sait que la contrainte effective est sensible au champ de contrainte.
- ✓ La ténacité KIC est mesurée dans des conditions statiques, l'énergie Charpy dans des conditions dynamiques avec une loi de comportement différente, la température de transition aussi est sensible à l'état de contraire (elle est plus basse pour les éprouvettes présentant des fissures courtes que celle obtenue sur des éprouvettes présentant des fissures longues).

II.6.7 Essais de pliage

L'essai de pliage consiste à solliciter en flexion une éprouvette de section carrée. Généralement, cet essai est réalisé avec contrôle visuel, pour une grande déformation jusqu'à atteindre un angle de pliage spécifique. Nous avons fait deux essais de pliage sur la machine Mohrfedehaf (Zwick-Roller) (Figure), dans le but de déterminer les graphes de force-pénétration. Premièrement, on a préparé deux éprouvettes plates rectangulaires de la même coulée de longueur $L_p=350$ mm, de largeur $D_p=30$ mm et d'épaisseur $E_p=14.7$ mm.

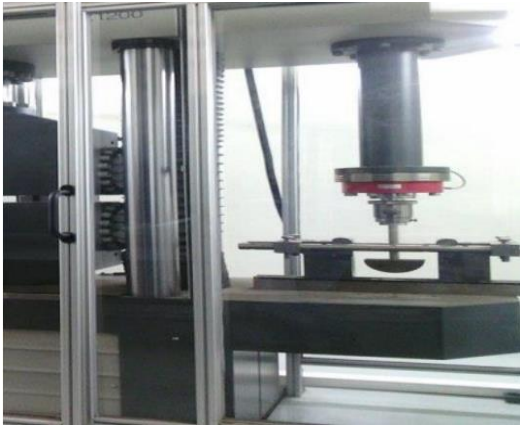


Fig. II .25 : Machine de pliage



Fig. II .26 : Etat final

II.6.8 Essais réalisés

II.6.8.1 Analyse chimique

Le carbone et le manganèse ont l'impact le plus important sur la valeur du C_{eq} en ce qui concerne les aciers modérément alliés. C'est pourquoi pour les calculs d'ordre général, la formule peut parfois être raccourcie :

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

Le C_{eq} pour le tube et les soudures correspondantes est en principe inférieure à 0,4%.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6}$$

Note 1 : $Cu + Ni + Cr + Mo \leq 0.50\%$

Note 2 : $Nb + V + Ti \leq 0.15\%$

Note 3 : $\%C \leq 0.10 \longrightarrow C_{qcm} = C + (Si / 30) + (Mn + Cu + Cr) / 20 + Mo/15 + Ni/60 + V/10 + 5B$

$$C_{qcm} Max = 0.20(7)$$

Note 4 : %C \geq 0.10 $C_{eq} = C + Mn/6 + (Mo + V + Cr)/5 + (Cu + Ni)/15$

$$C_{eq}Max = 0.38 \quad (8)$$

II.6.8.2 Résultats d'analyse chimique sur les machine A et B à ALPHAPIPE

Pv	Coulée	Bobine	Test	ELEMENTS CHIMIQUE-%														PCM	
				C x10 ⁻²	Si x10 ⁻²	Mn x10 ⁻²	P x 10 ⁻³	S x10 ⁻³	Cr x10 ⁻³	Ni x10 ⁻³	Mo x10 ⁻³	Al x 10 ⁻³	Sn x 10 ⁻³	Cu x10 ⁻³	Nb x 10 ⁻³	Ti x 10 ⁻³	Vx 10 ⁻³		(Nb +Ti +V) x10 ⁻³
	tolérances			12	45	170	25	15	300	300	100	50	10	250	60	60	100	150	0,20
1	664832	831385	B121	7	35	158	0	3	41	32	9	46	1	22	57	4	80	141	0,180
2	664839	831380	B169	8	36	160	0	4	42	32	9	47	1	22	58	4	80	142	0,190
3	633555	824734	B199	8	36	168	0	5	43	32	9	47	2	23	59	4	80	143	0,190
4	664849	824720	B232	8	36	168	0	6	43	32	9	47	2	22	59	4	80	143	0,190
5	664994	831416	B245	7	34	162	0	4	52	50	11	36	1	21	58	3	80	141	0,180
6	633544	824702	B224	8	34	163	0	4	52	49	10	35	1	21	60	3	80	143	0,180
7	633710	831435	B371	7	33	163	0	4	52	50	11	35	1	22	57	3	80	140	0,180
8	730419926	216040	A631	8	34	160	0	5	35	24	5	34	1	17	59	13	3	75	0,190
9	730419924	8826033	B278	7	21	164	0	4	14	15	3	31	0	13	59	11	2	72	0,160
9	730419924	8826033	B596	7	19	154	0	2	16	15	5	44	0	12	64	12	2	78	0,150
10	730427473	8304029	B1065	7	21	165	0	4	14	15	3	31	0	13	64	11	2	77	0,160
11	665011	836399	B431	7	34	163	0	4	53	51	11	36	1	22	57	3	80	140	0,180
11	665011	836397	B2691	8	36	167	17	0	50	32	8	33	1	19	56	4	80	140	0,190
12	633818	104113	B1257	7	34	166	0	4	39	31	5	34	1	20	57	3	90	150	0,180
13	667213	202373	A617	7	34	165	0	4	39	31	5	35	1	20	56	3	80	139	0,180
14	636269	208543	A79	6	34	164	0	3	39	32	5	35	1	20	55	3	80	138	0,170
15	730529105	206045	B2233	7	20	167	0	4	30	15	4	29	0	10	65	10	2	77	0,170
15	730529105	206046	B1194	6	22	161	17	0	29	16	6	32	0	16	61	12	2	75	0,150
16	633813	8421181	B2204	7	34	166	0	5	40	31	5	34	2	20	56	3	90	149	0,170
16	633813	8421181	B1371	6	20	156	0	3	16	16	5	37	0	14	57	4	80	141	0,170

II.6.8.3 Résultat de la composition chimique

Il s'agit d'une nuance d'acier à base carbone faiblement alliée aux éléments à dispersives au niobium-titane-vanadium. Notre étude consiste à faire des examens sur une tubes soudés en spirale de dimensions suivantes (matériaux X70, épaisseur = 12.7 mm, diamètre = 48"). Tel que montré dans le tableau :

Tableau. II.9: Résultats de l'analyse chimique.[17]

Elément	L'indice %	Tube B232
Carbone	C	0.08
Soufre	S	0.006
Phosphore	P	<0.000
Silicium	Si	0.36

Manganèse	Mn	1.68
Aluminium	Al	0.047
Niobium	Nb	0.59
Vanadium	V	0.08
Titane	Ti	0.004
Nickel	Ni	0.032
Cuivre	Cu	0.022
Chrome	Cr	0.043
Molybdène	Mo	0.009
Etain	Sn	0.002
Fer	Fe	97.576

Note 3 : $\%C \leq 0.10 \rightarrow C_{qcm} = C + (Si / 30) + (Mn + Cu + Cr) / 20 + Mo/15 + Ni/60 + V/10 + 5B$

$$C_{qcm} Max = 0.188 \quad (9)$$

II.6.9 Essai dureté

II.6.9.1 Résultats expérimentaux de l'essai dureté Vickers (HV 10)

Nous avons réalisées des essais de dureté sur la machine (ZWICK) HV10, étalonnée et certifiée, au laboratoire ALFAPIPE, sur des éprouvettes voir la figure 8.5, comme la machine et assistée par ordinateur, qui nous a permet de tracer la courbe de la dureté.

Teste standard : HV 10, matériau nuance : X70

Variation des charges : maximum 10 kg et la charge minimum 200 g.

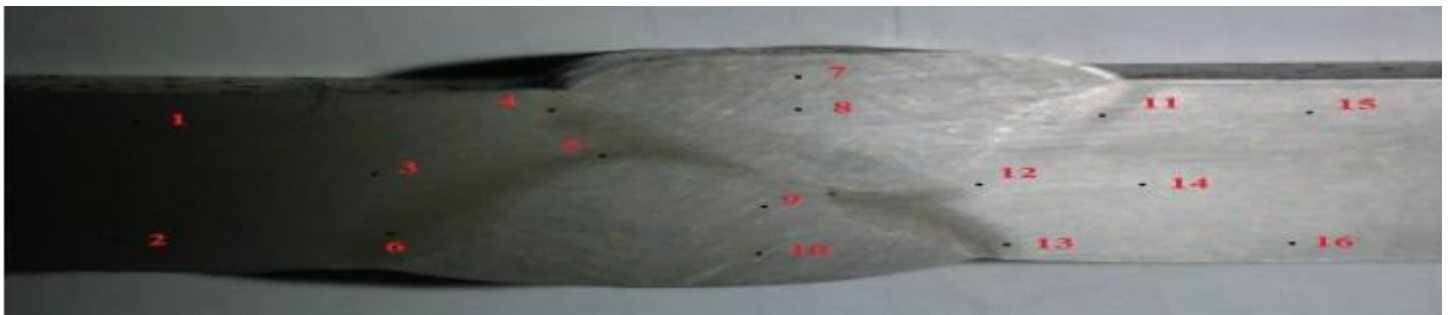


Fig. II.27: Eprouvettes avec joint de soudure bout à bout pour la dureté Vickers (Acier X 70).[17]

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

Nous avons relevée des résultats sur deux éprouvettes de deux tubes [B596 et A79], nous reportons les valeurs moyennes comme sont indiquées aux tableaux IV.16 , sur la paroi extérieur tel que montrer par les points [1, 4, 8,11, 15], et les points du milieu [3, 5, 11,12,14], par contre pour les point de la paroi intérieur du tube [2, 6, 10, 13, 16], ces résultats sont représentés par les courbes de la figure 8.6. [15]

II.6.9.2.Résultats essai de dureté sur les machine A et B à ALPHAPIPE

Coulée	Bobine	Tube	Pv	Métal de base Maxi 250						Cordon de soudure MAXI 250				ZAT Maxi 250					
				1	2	3	14	15	16	7	8	9	10	4	5	6	11	12	13
664832	831385	B121	1	209	216	217	232	221	228	221	225	232	236	205	216	247	216	210	220
664839	831380	B169	2	224	218	214	228	216	218	219	221	225	222	212	205	240	216	202	233
633555	824734	B199	3	205	205	205	205	204	204	222	222	219	221	220	219	228	220	218	228
664849	824720	B232	4	211	212	213	211	209	210	220	222	224	224	221	222	231	220	224	226
664994	831416	B245	5	205	204	205	204	203	204	223	222	216	224	218	213	220	228	222	220
633544	824702	B224	6	215	219	216	218	216	220	225	223	224	233	221	225	230	222	220	221
633710	831435	B371	7	210	211	207	208	208	206	222	226	223	232	222	220	232	225	223	228
730419926	216040	A631	8	220	217	219	221	221	224	224	237	222	238	226	225	236	219	222	237
730419924	8826033	B278	9	217	216	216	217	213	217	217	223	223	240	219	217	225	217	223	212
730419924	8831025	B596	9	221	214	217	224	225	222	227	225	230	238	220	224	232	220	222	228
730427473	8304029	B1065	10	215	224	218	225	225	219	221	221	220	223	221	221	223	226	228	234
665011	836399	B431	11	214	215	212	210	212	215	217	219	222	222	227	224	218	223	221	219
665011	836397	B2691	11	211	214	210	218	214	213	227	221	232	242	222	226	241	223	221	232
633818	104113	B2257	12	217	208	213	212	210	214	225	226	226	226	227	224	222	220	227	212
667213	202373	A617	13	210	216	212	220	219	228	231	216	242	242	216	206	243	203	244	215
636269	208543	A79	14	203	216	226	206	211	210	223	219	240	206	214	218	223	210	242	220
730529105	206045	B2233	15	215	215	213	216	214	214	218	219	220	229	226	227	239	228	221	221
730529105	206046	B1194	15	210	221	215	214	214	210	207	201	225	232	207	205	232	203	208	224
633813	8421181	B2204	16	205	205	205	209	207	209	213	218	220	220	209	204	220	209	213	221

Tableau II.10 :Résultats d’essai Vickers.[17]

Points	1	4	8	11	15	Extérieur
Distances	5	13	18	23	31	
Dureté de tube	221	220	225	220	225	
La résistance Rm N/mm ²	707	720	739	713	725	
Points	3	5	9	12	14	Au milieu
Distances	10	15	18	21	26	
Dureté de tube B596	217	224	230	222	224	
La résistance Rm N/mm ²	738	738	778	771	716	
Points	2	6	10	13	16	Intérieur
Distances	5	13	18	23	31	

Dureté de tube B596	214	232	238	228	222	
La résistance Rm N/mm²	716	751	739	745	718	

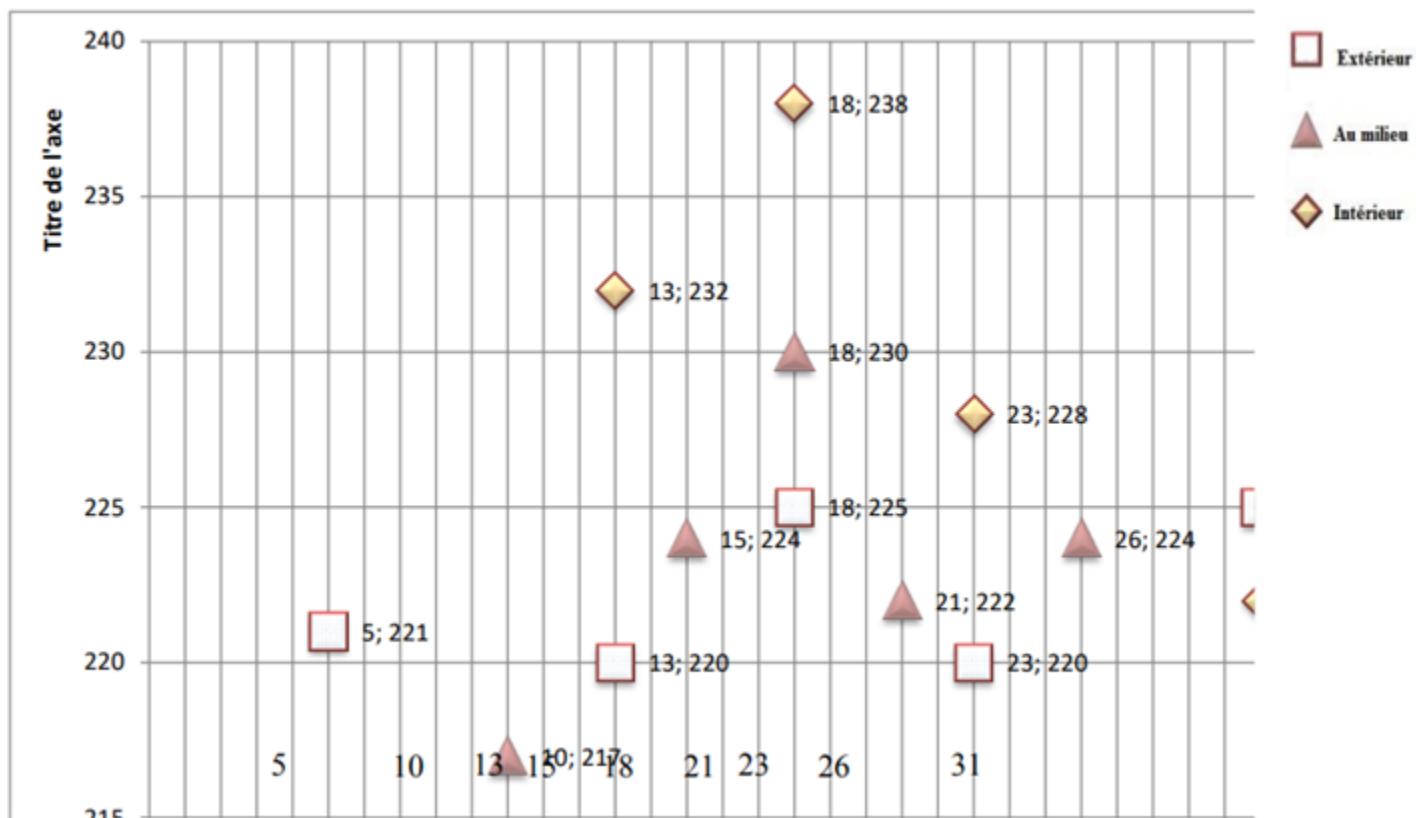


Fig. II.28 : Evolution de la dureté Vickers en fonction de la distance mesurée de tube B596.[17]

II.6.10.Essai de traction

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques (la résistance ultime à la traction, la limite apparente d'élasticité à 0.2% et l'allongement caractéristiques pour le métal de base et la résistance à la traction du cordon de soudure. [14]

1. La limite d'élasticité (R_e) : MPa
2. La résistance à la traction (R_m) : MPa
3. Le pourcentage d'allongement après rupture (A%)

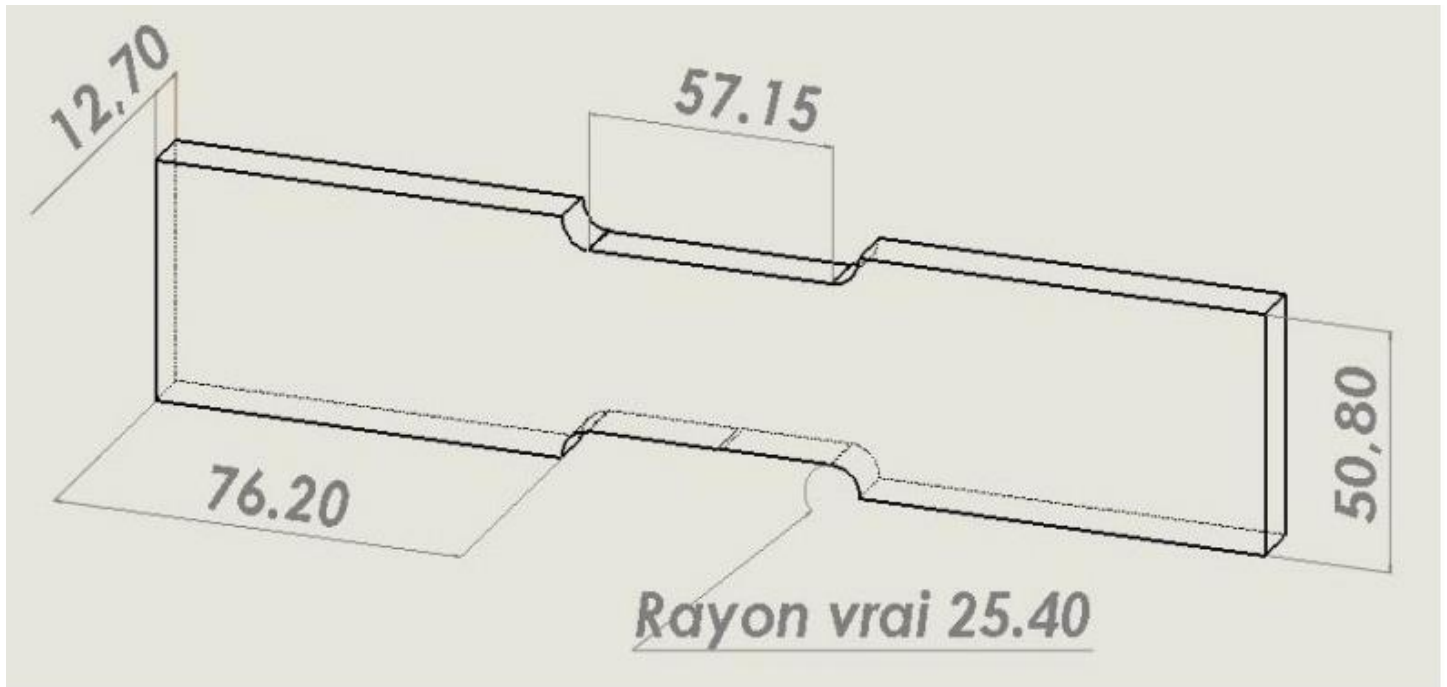


Fig. II.29 : Epreuve normalise selon la norme API5L

Tableau II.11 :La norme API 5L PSL2.[17]

Projet		TAM 48''		FABRICATION ET CONTROLE SELON LA NORME API5L
Diamètre		1219.2 mm		
Nuance		X70		
Epaisseur		12.95 mm		
Contrôle destructif *laboratoire mécanique*				
Essai de traction				
Essais	Éprouvette	MIN	MAX	
Traction	1 métal de base			
$E_{0.5}$	Selon la norme API5L	485 MPa	635 MPa	
R_m		570 MPa	760 MPa	
$E_{0.5}/R$		0.79 %	0.90 %	
A%		22%		-
Traction sur soudure	1 Cordon de soudure			
TS		570 MPa	760 MPa	

- La norme API5L exige deux éprouvette dans l'essai de traction :
 - ✓ T.B : traction sur métal de base.
 - ✓ T.S : traction sur cordon de soudure.
- La machine d'essai de traction utilisé MOHR de capacité Max 600 kn
- Les résultats sont donnés par le logiciel texspert sous forme :
 - ✓ Tableau : les caractéristiques mécaniques de métale de base et la soudure.
 - ✓ La courbe rationnelle de traction pour le métale de base



Fig.II.30 : Machine d'essais de traction[17]

II.6.10.1. Résultats essai de traction sur les machine A et B à ALPHAPIPE

			Résultats Essai de traction				
			E _{0.5} MPa	R _m MPa	TS MPa	A%	R _{t0.5} /R _m
			<i>Min=485</i>	<i>Min=570</i>	<i>Min=570</i>	<i>Min=22%</i>	
Coulée	Bobine	Tube	<i>Max=635</i>	<i>Max=760</i>	<i>Max=760</i>		<i>Max=0,90</i>
730418951	8223054	B1037	527	625	688	34,7	0,84
665007	836415	B468	578	679	716	33,8	0,85
667452	208521	B2739	539	658	715	34,7	0,82
730419530	8814019	B831	499	605	665	36,5	0,82
636028	202384	A110	460	666	726	39	0,75
730410118	216041	B2554	507	625	684	34,1	0,81
633214	823783	B251	511	671	724	35,9	0,76
635983	202442	A221	544	677	725	34,7	0,8
730427366	8213020	B1052	513	605	667	37,2	0,85
730427366	8228046	B1282	450	645	674	42	0,69
667214	202370	A124	528	676	718	35,4	0,78
636150	208607	A129	556	674	724	35,8	0,82
635984	202331	A185	542	676	724	36,7	0,8
636147	202523	B2731	554	666	725	35	0,83
667130	202380	B2858	517	671	720	36,1	0,77
730529038	206049	B2282	520	622	670	34,7	0,84
730529038	216029	B1234	465	675	726	39	0,68
730529097	261042	B1954	498	597	666	38	0,83
664368	7647071	B114	523	649	689	37	0,81
667210	202467	A429	551	672	717	34,8	0,82
730418165	8733032	B53	517	623	682	33,3	0,83
730428115	8616086	B37	517	610	686	35,2	0,85
635760	208618	B2460	520	645	711	35,5	0,81
665135	889369	B2051	574	670	715	34,9	0,86
665135	889373	B1400	531	666	712	36	0,8
667354	208535	A156	545	666	718	39,5	0,82
730419007	8223045	B60	514	611	670	35,2	0,84
633546	823765	B106	519	644	705	36,1	0,81
664828	823732	B866	530	656	712	35,8	0,81
635914	202431	A395	450	660	713	41,5	0,68
633545	824690	B2149	560	677	729	34,4	0,83
730419754	8505036	B959	528	628	688	33,3	0,84
730419754	8736050	B827	514	614	672	36	0,84

II.6.10.2.Des exemples avec les graphes des différents tubes

Tableau. II .12 : Résultats essai de traction sur tube A110.[17]

Coulée	Bobine	Tube	Résultats Essai de traction				
			E0.5 MPa	RmMPa	TS MPa	A%	E/Rm
636028	202384	A110	460	666	726	39	0.75

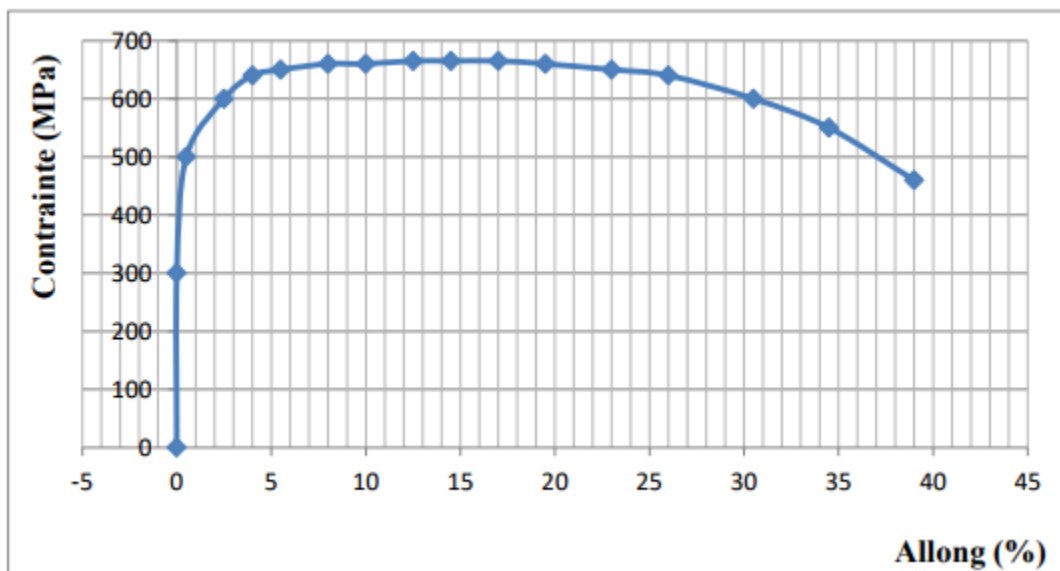


Fig. II.31 : Graphe de traction sur tube A110.[17]

Tableau. II .13 : Résultats essai de traction sur tube B1234.[17]

Coulée	Bobine	Tube	Résultats Essai de traction				
			E0.5 MPa	RmMPa	TS MPa	A%	E/Rm
730529038	216029	B1234	465	675	726	39	0.68

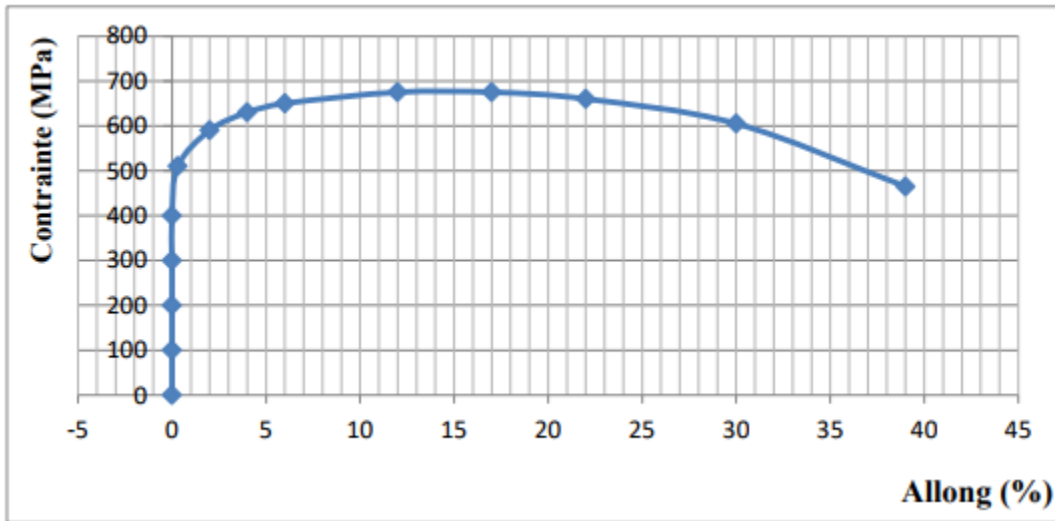


Fig. II .32 :Graphe de traction sur tube B1234.[17]

Tableau. II.14 : Résultats essai de traction sur tube A156.[17]

Coulée	Bobine	Tube	Résultats Essai de traction				
			E0.5 MPa	RmMPa	TS MPa	A%	E/Rm
667354	208535	A156	475	670	718	39.5	0.71

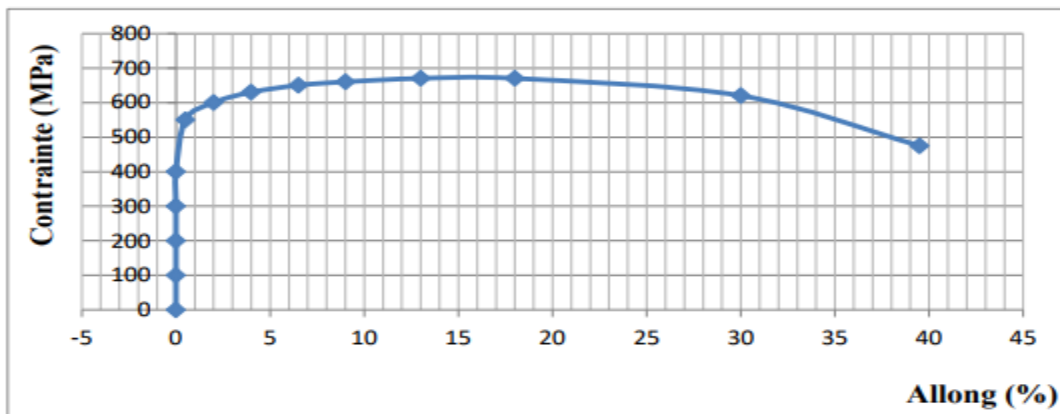


Fig. II.33 : Graphe de traction sur tube A156.[17]

Tableau. II.15 : Résultats essai de traction sur tube B1282.[17]

Coulée	Bobine	Tube	Résultats Essai de traction				
			E0.5 MPa	RmMPa	TS MPa	A%	E/Rm
730427366	8228046	B1282	450	645	764	42	0.69

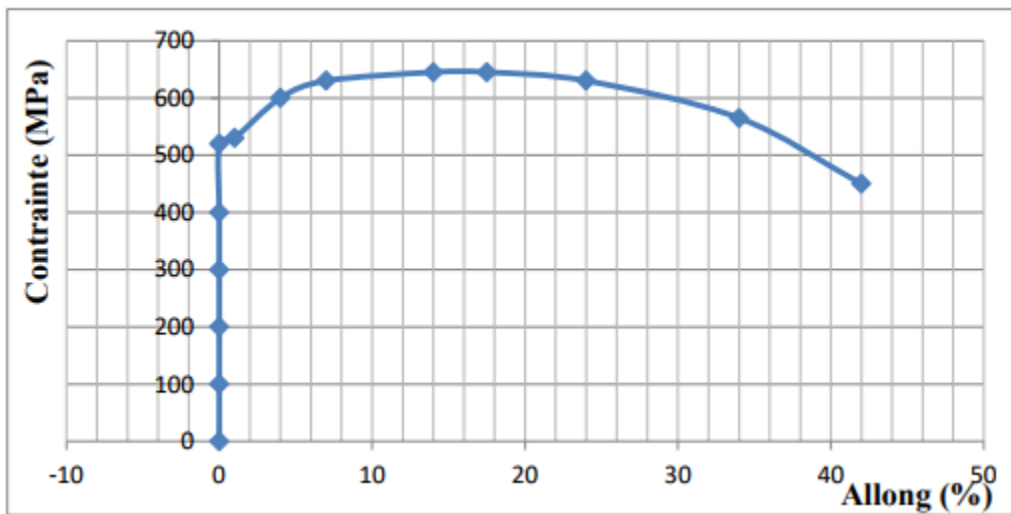


Fig. II .34 :Graphe de traction sur tube B1282.[17]

Tableau. II.16 : Résultats Essai de traction d'essai de traction tube A395.[17]

Coulée	Bobine	Tube	Résultats Essai de traction				
			E0.5 MPa	RmMPa	TS MPa	A%	E/Rm
635914	202431	A395	450	660	713	41.5	0.68

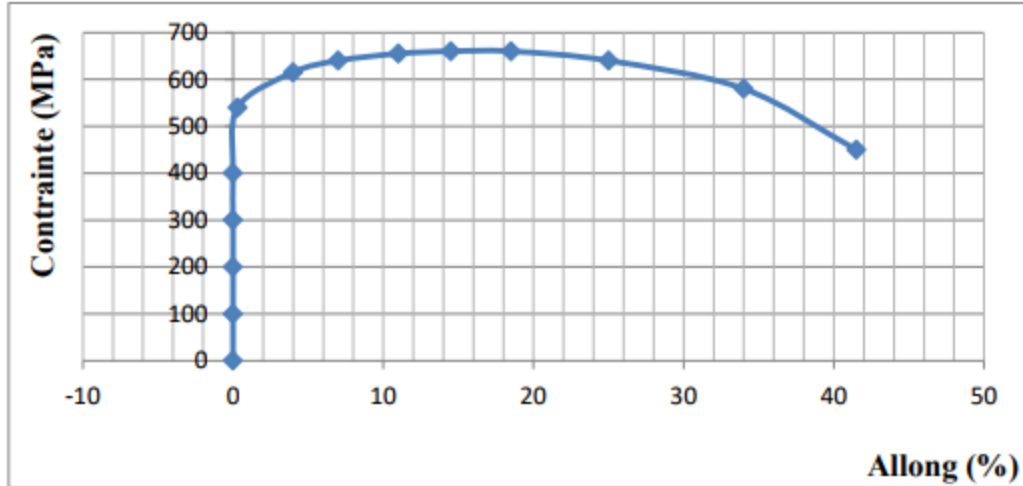


Fig. II.35 : Graphe de traction sur tube A395.[17]

II.6.11.Essai de résilience

Le test de résilience consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie W absorbée exprimée en joule dont on déduit la résilience (énergie exprimée en joule par cm^2 nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette). [15]

II.6.11.1.Eprouvette

Selon le type d'essai réalisé, les éprouvettes peuvent être disposées de différentes façons sur le bâti et possède ou non une entaille. Il existe plusieurs types d'éprouvette selon le type de matériau testé. Dans notre cas, l'éprouvette normalisée est représentée (figure II.36), ainsi les caractéristiques géométriques de l'éprouvette (entaille en V dont les dimensions sont résumées au tableau .[17]

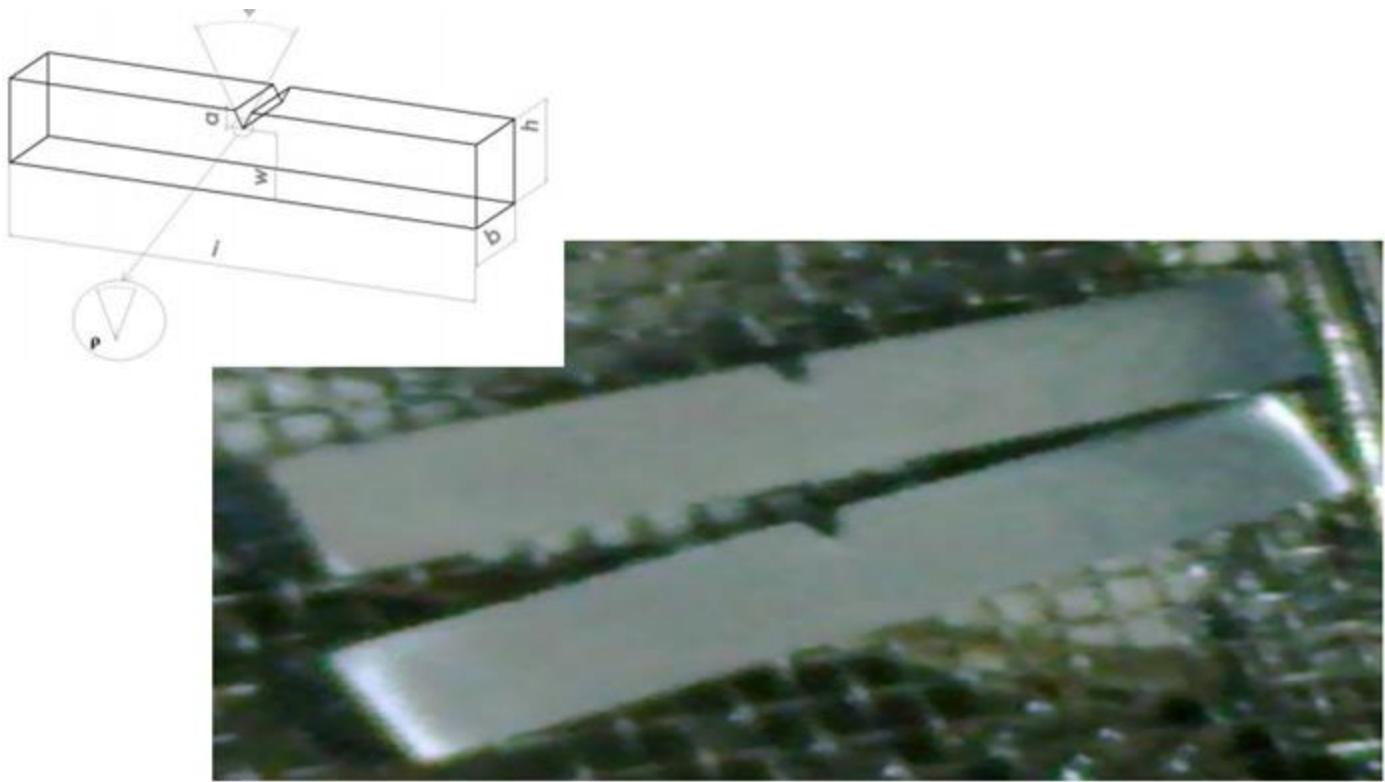


Fig. II.36 :Eprouvette normalisée de l’essai de résilience

II.6.11.2.Caractéristiques géométriques

Tableau II.17 : Caractéristiques géométriques.[17]

Longueur (i)	Largeur (b)	Epaisseur (h)	W
55± 1 mm	10 ± 0.2 mm	10 ± 0.2 mm	8 mm
Type d’éprouvette	Rayon d’entaille	Angle d’entaille	Profondeur
V	p	ψ	a
Charpy V	0.25 mm	45°	2 mm

Ces essais sont effectués sur une machine Charpy dont la capacité maximale est de 300J. Nous avons effectuée 30 essais [-20 C° ; +20 C°] au laboratoire de l’essai mécanique ALFAPIPE, conformité à la norme API 5 L X70 PSL2 (API 5L: American Petroleum Institute, Spécifications pour API 5L adhérer à l’Organisation internationale de normalisation , X70 : grade de l’acier au carbone manganèse utilisé pour le transport des hydrocarbures sous une pression de service de 70 bars, PSL 2 : des exigences obligatoires pour équivalent carbone , la ténacité , la limite d’élasticité maximale et résistance à la traction maximale).[17]
















Température (°C)	Four	Métal de base	Métal avec soudure
Eprouvette N°1 T = 20°			
Eprouvette N°2 T = 10°			
Eprouvette N°3 T = 0°			
Eprouvette N°4 T = -10°			
Eprouvette N°5 T = -20°			

Fig. II.37 : Éprouvette de résilience après la rupture à différentes températures pour le métal de base et Métal avec soudure. [17]

II.6.12. Analyse des résultats

Tableaux II.18 : Les résultats expérimentaux de l'essai de résilience à différentes températures des éprouvettes de métal de base (MB)[17]

	Métal de base (MB)			
	Kv 1 (J/cm ²)	Kv 2 (J/cm ²)	Kv 3 (J/cm ²)	Kvmoy (J/cm ²)
-20	206	202	206	204.66
-10	210	216	210	212
0	238	248	242	242.66
10	250	246	251	249
20	254	256	268	259.33

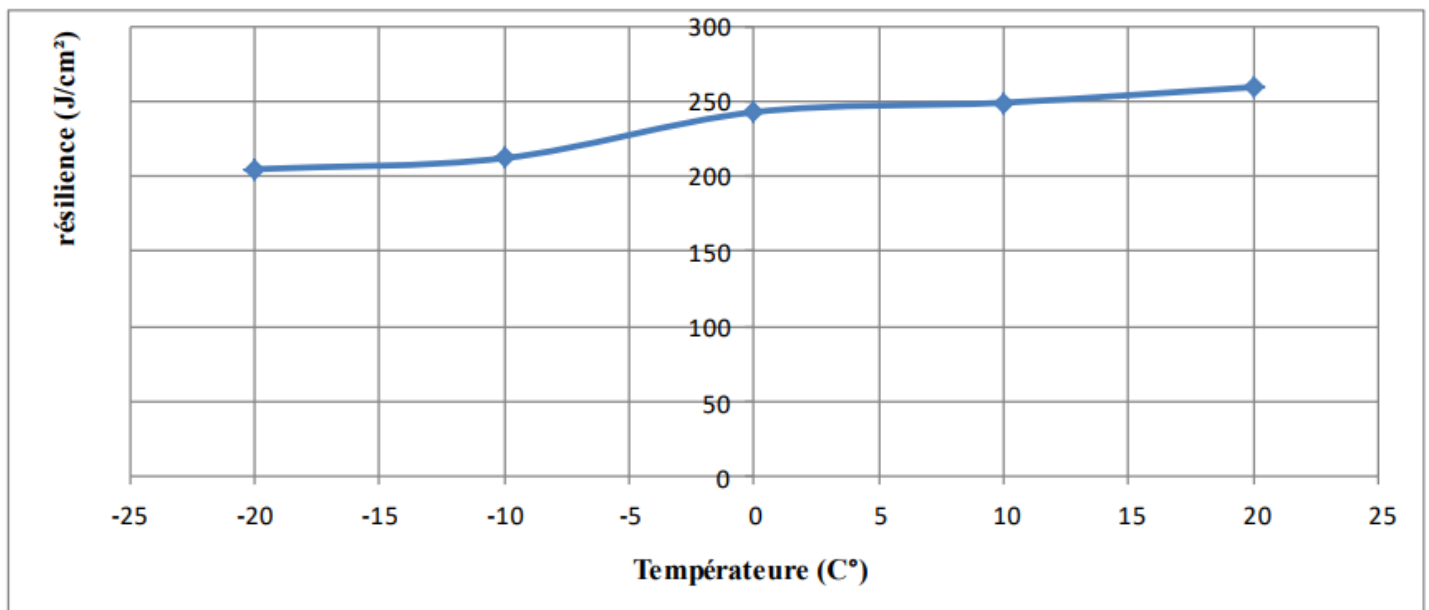


Fig. II.38 : Résultat de l'essai de résilience à différentes températures pour le métal de base.[17]

Tableau. II .19 : Les résultats expérimentaux de l'essai de résilience à différentes températures des éprouvettes avec joint de soudure.[17]

	Joint de soudure			
	Kv 1 (J/cm²)	Kv 2 (J/cm²)	Kv 3 (J/cm²)	Kvmoy (J/cm²)
-20	165	162	169	165.33
-10	179	180	190	183
0	190	189	191	190
10	193	197	196	195.33
20	205	201	206	204

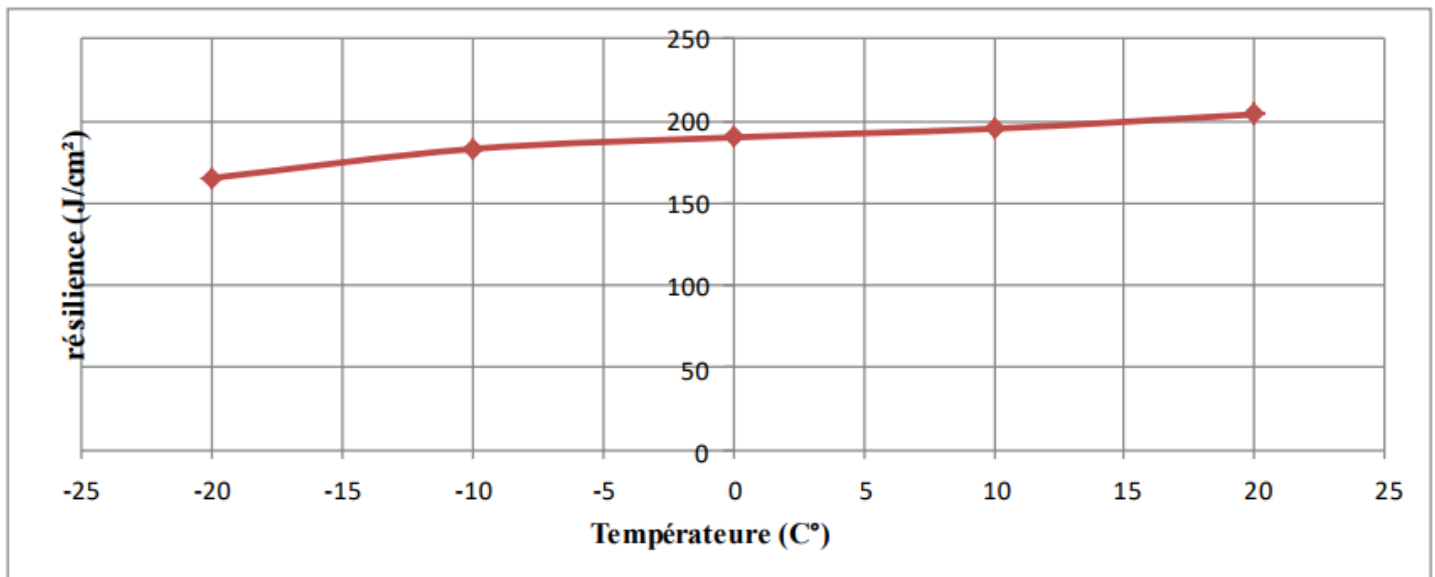


Fig. II.39 : Courbe de l'essai de résilience à différentes températures pour le métal avec soudure.[17]

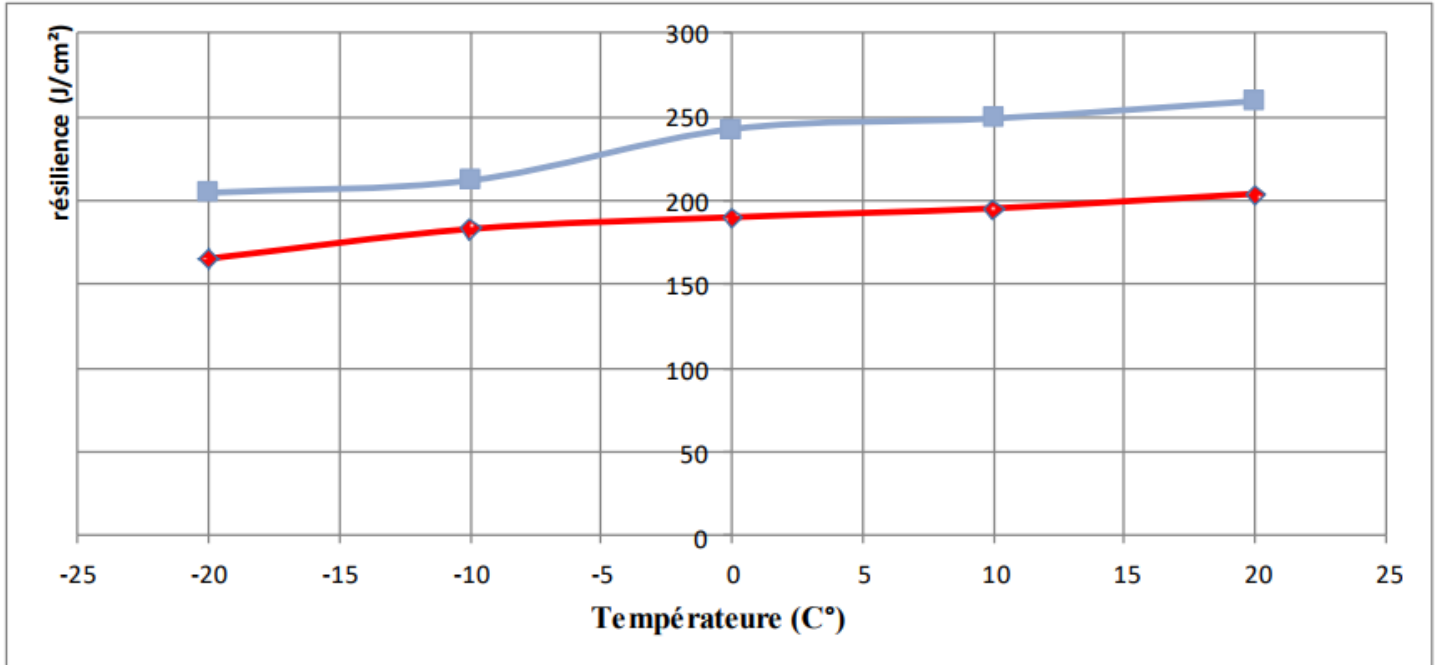


Fig. II.40 : Courbe de l'essai de résilience à différentes températures pour le MB et avec MS.[17]

Les résultats expérimentaux des essais de résilience à différentes température pour le matériau de base sont présentés au tableau II.10 et pour les éprouvettes avec un joint de soudure sont montrées au tableau II.11. Nous avons reporté les résultats expérimentaux, ou nous montrons que l'énergie absorbée pour rompre l'éprouvette augmente progressivement avec l'augmentation de la température pour les éprouvettes du matériau de base entre les valeurs de [204 J/cm² ; 259 J/cm²] et de la même remarque et fait pour les éprouvettes avec joint soudure que l'énergie augmente de [165 J/cm² ; 204 J/cm²] qui est représentée. Nous remarquons que les énergies des éprouvettes avec soudure est faible par rapport aux éprouvettes de matériaux, qui représente l'effet de la soudure (voir la figure).

Nous remarquons une légère différence. Ce qui montre que l'énergie de rupture des éprouvettes avec joint de soudure est inférieure par rapport au matériau de base, mais cette différence est faible. La 3^{ème} remarque que nous pouvons constater est que pour avoir la zone fragile de ce matériau, il faut encore abaisser la température, pour aller de la zone ductile vers la zone fragile (au palier inférieur de la courbe de résilience), la température doit être au moins -165.33 °C. Nous sommes limités par les dispositifs pour abaisser la température à -100 °C, afin d'obtenir la zone fragile de matériau pour observer le faciès de rupture.

II.6.13. Corrélation entre la résilience et la ténacité du matériau

Calcul ténacité de matériaux critique (K_{IC})

D'après les résultats et le diagramme de K_v , on peut introduire les relations empiriques mentionnées pour les calculer au facteur d'intensité de contrainte critique KIC dans la zone de la courbe.

La relation empirique de Rolfe et Barsom est :

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right) = 0.646 \left(\frac{K_v}{\sigma_e}\right) - 6.35 \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

$$K_{IC} = \sqrt{\sigma_e^2} \left[0.646 \left(\frac{K_v}{\sigma_e}\right) - 6.35 \cdot 10^{-3} \right] \quad (11)$$

Tableau. II.20 : Résultat du facteur d'intensité de contrainte KIC ($MP\sqrt{m}$)

Métal de base		
Température C°	Résilience K_v (J/cm²)	Ténacité KIC ($MP\sqrt{m}$)
-20	204.66	269.90
-10	212	274.83
0	242.66	294.48
10	249	298.44
20	259.33	304.71

Tableau. II.20 : Résultats du facteur d'intensité de contrainte KIC ($MPa\sqrt{m}$)

Joint soudé		
Température C°	Résilience K_v (J)	Ténacité KIC ($MP\sqrt{m}$)
-20	165.33	241
-10	183	254.78
0	190	259.77
10	195.33	263.50
20	204	269.45

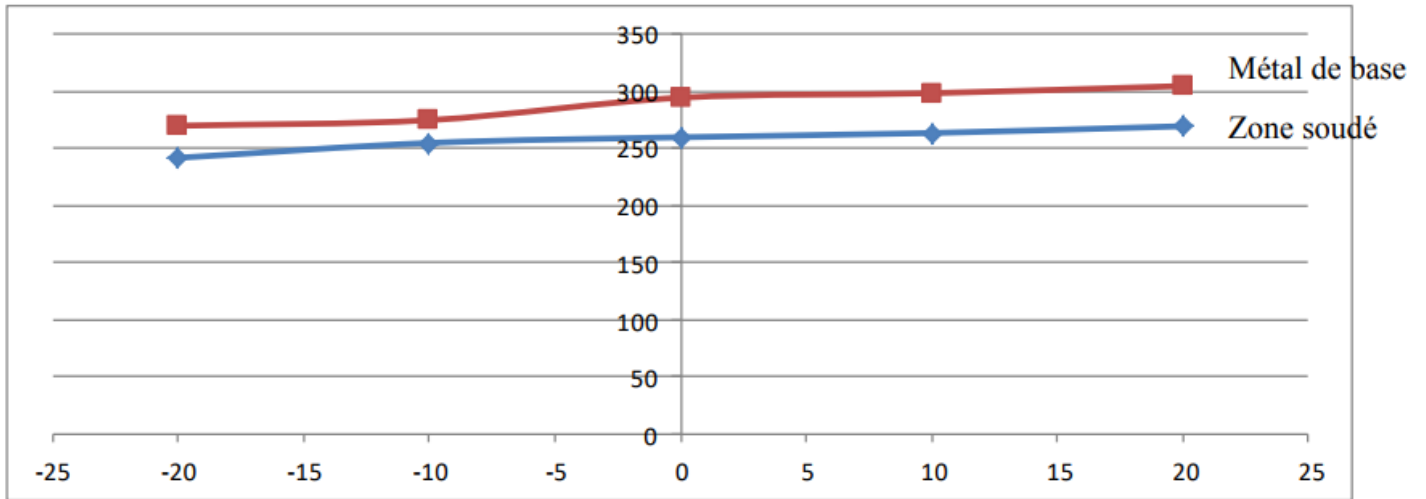


Fig. II.41 : Courbe de la ténacité pour les éprouvettes de métal de base et les éprouvettes avec un joint de soudure.

Remarque :

Pour le tube soudé en spirale sous pression interne de $P= 103$ bar dans le cas d'une fissure longitudinale (ouverture de l'entaille dans le mode I) et comme le tube est soumis à une sollicitation de traction), on calcule alors la contrainte circonférentielle σ_{θ} comme suit [16] :

$$\sigma = \frac{pd}{2t} \qquad \text{donc} \qquad \sigma_{max} = \frac{pd}{at}$$

II.6.15.Essai de pliage

Deux essais de pliage en droit et en vers sont réalisés afin de rechercher toutes les imperfections de tension dans la soudure ou prouver sa bonne qualité. Après ces essais, le cordon de soudure est soumis à un contrôle visuel pour la détection d'éventuels défauts débouchant à la surface.

Pour but d'évaluer la capacité de déformation plastique d'un matériau donc d'un vérifier la ductilité. Ses résultats sont :

- 1) L'éprouvette ne doit se rompre au pliage.
 - 2) Après pliage la surface tendue de l'éprouvette ne doit pas être fissurée.
- L'éprouvette de cette essai sont les mêmes utilisées dans l'essai de traction.

Tableau II.22 : L'essai de pliage selon la norme API 5L

	Longueur de crique
Endroit	Dans le métal d'apport $\leq 3\text{mm}$
Envers	Dans le métal de base $\leq 6\text{mm}$

II.7.Conclusion générale

Cette étude a permis de développer une partie du travail important sur le contrôle qualité lors de la production de tubes d'acier dans l'entreprise ALFAPIPE. Le stage et le mémoire réalisés au sein de cette entreprise permettent de donner les conclusions suivantes :

- Nous avons représenté la composition chimique de l'acier utilisé. La composition telle qu'elle ressort des analyses sur coulée est conforme aux exigences de la norme API 5L.
- Dans les essais de dureté, nous avons analysé la dureté dans la zone de la soudure, le prélèvement a été partagé en trois parties extérieure et intérieure du tube plus influencée au milieu de la paroi.
- Nous remarquons une chute de dureté dans la zone de soudure dans la paroi intérieure, et la différence de dureté de l'ordre de 5%. D'autre part, d'après les normes API 5L. On ne doit pas dépasser 50% de l'indice de la dureté entre la paroi extérieure et intérieure.

Ce matériau possède une grande ductilité et bonne ténacité, ce qui convient pour les pipelines. Un bon recouvrement du tube, nous pouvons protéger la matière contre la corrosion est les pipelines peuvent jouer leurs rôles sous-marine.

- Les cinq tests de traction sur des éprouvettes de métal de base et avec joint de soudure, qui sont réalisées sur la machine MOHRE FEDEHAF (ZWICK) UPD 60, au laboratoire ALFAPIPE, nous ont permis d'étudier les caractéristiques mécaniques du matériau en acier grade X70, ces résultats correspondant bien pour ce type de réalisation des tubes telle que mentionnée dans les normes Américaine API 5L, aussi ce matériau a une grande ductilité qui est représentée par la courbe de contrainte déformation, ce qui montre que cet acier a une grande déformation plastique et une bonne résistance.
- Nous avons effectuée sur la machine de l'essai de Charpy qui a capacité maximale de 300 J. nous avons réalisés 30 essais de résiliences sur des éprouvettes normalisées du métal de base et avec un joint de soudure dans l'intervalle de température de (-20°C jusqu'à +20°C) au laboratoire ALFAPIPE pour mieux localiser les zones dans la courbe de résilience nous remarquons que la seule zone obtenue est celle de la zone ductile, pour étudier la zone fragile il faut abaisser encore la température au-dessous de -20°C.

La seconde remarque que l'énergie absorbée par les éprouvettes de métal de base est supérieur par rapport à celui des éprouvettes avec soudée, et qui montre aussi que les éprouvettes de métal de base ont un faciès de rupture ductile à présente un aspect mat avec texture fibreuse.

Nous avons introduit une corrélation entre le facteur de résilience et la ténacité du matériau par la relation empirique de Rolf et Barsomrés pour avoir le facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} .

Chapitre 3

Processus industriel et simulation numérique d'une opération de cintrage d'une tôle

III.1 Introduction

Le procédé de roulage a pour objectif de transformer une surface plane métallique en une surface cylindrique ou conique. Les machines à rouler sont appelées simplement rouleuses. Les organes de roulage sont constitués par des cylindres d'une grande résistance à la flexion nommés rouleaux. Il existe trois principaux types de rouleuses, à deux, trois ou quatre rouleaux.

Une opération de roulage est définie par les paramètres du roulage suivant :

- ✓ Les caractéristiques mécaniques du matériau de la tôle.
- ✓ L'épaisseur de la tôle.
- ✓ La largeur utile de roulage.
- ✓ Le rayon de courbure.

La simulation numérique constitue un outil efficace et robuste pour prédire la faisabilité des produits avec les moindres dépenses. De nos jours il existe plusieurs logiciels industriels basés sur des approches incrémentales comme ABAQUS, ADINA, LS-DYNA, AUTOFORM, RADIOSS, STAMPACK, etc. qui sont basés sur des algorithmes de résolution de type statique implicite ou dynamique explicite.

III.2 Roulage de tôle

Le roulage de tôle (cintrage de tôle) est une technique de transformation d'une surface plane en surface cylindrique ou conique fermée (roulage fermé : virole) ou roulage ouvert.

La tôle est animée d'un mouvement de translation par deux rouleaux commandés mécaniquement et elle est soumise à un effort continu de flexion exercé par 1 ou 2 rouleaux [18].

Cintreurs. Selon la disposition des rouleaux, on distingue trois types de machines : type pyramidal, planeur, croqueur. Pour extraire les corps cintrés, complètement fermés, le rouleau supérieur peut être dégagé de l'un de ses paliers et pivoter dans un plan vertical ou horizontal. On dit que le rouleau est amovible. Pour tenir compte de l'élasticité résiduelle, on estime généralement que le diamètre mini de cintrage est égal au diamètre du rouleau supérieur (fonction de la nature du matériau et de la longueur à cintrer).

III.3 Différents types de rouleuses

Il existe plusieurs types de la rouleuse utilisée pour le roulage des tôles :

- ✓ Rouleuses de type pyramidal
- ✓ Rouleuses de Type planeur à 4 rouleaux
- ✓ Rouleuses de Type planeur à 3 rouleaux
- ✓ Rouleuse de type croqueur
- ✓ Rouleaux inférieurs symétriques à déplacement vertical
- ✓ Rouleaux inférieurs symétriques à déplacement horizontal
- ✓ Rouleaux inférieurs asymétriques

Dans notre exemple, nous avons utilisé la rouleuse de type planeur à 3 rouleaux

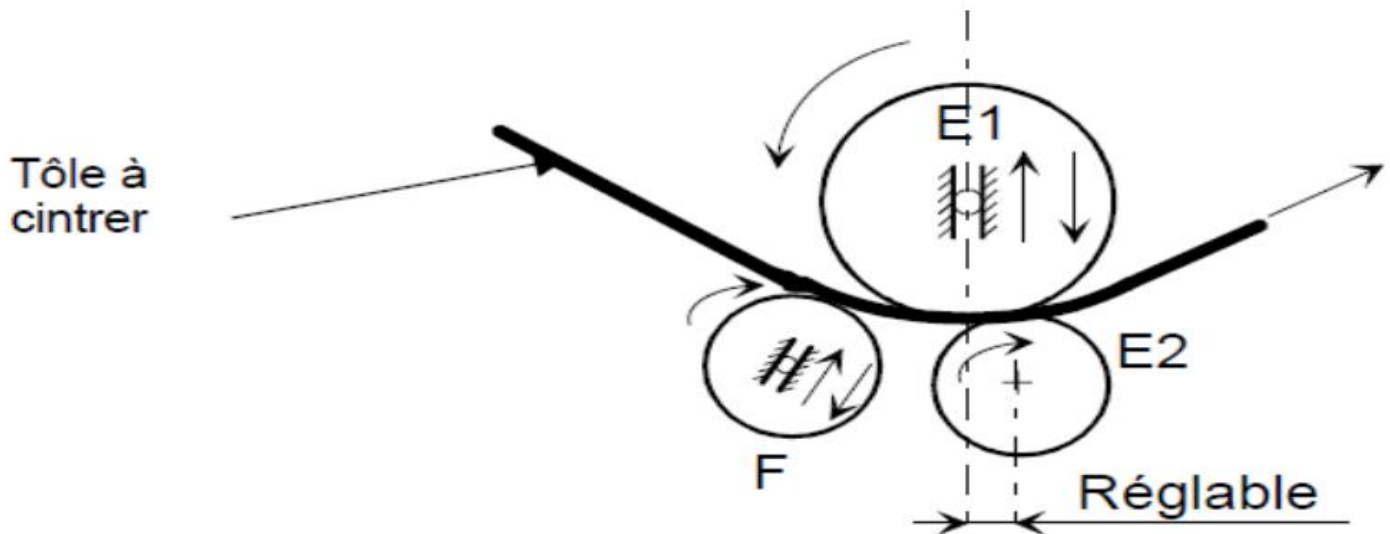


Fig. III.1 : Rouleuses de Type planeur à 3 rouleaux.

III.4 Phases de l'opération

Le figure ci-dessous montre l'opération d'entortillage de cylindre normale. L'expertise de l'ouvrier et la durée d'entortillage aura un important impact sur la finalisation du produit.

- ✓ Avant de placer la tôle dans la machine, vérifiez que la balle de cylindre inférieure est au niveau le plus bas. Si elle n'y est pas, mettez-la dans cette position
- ✓ La tôle est placée dans la machine par le côté gauche. On peut la placer par la côté droite aussi. Toutes les opérations se font par le mouvement simultané des balles de cylindre latérales.

- ✓ Soulevez la balle de cylindre de droite. En appuyant la tôle sur la balle de cylindre, assurez qu'elle soit parallèle.
- ✓ Puis en soulevant la balle de cylindre inférieure coincez la tôle. Le réglage de la pression pour coincer la balle inférieure.
- ✓ Faites descendre la balle de cylindre droite. En faisant tourner les balles de cylindre rapprocher le matériau vers la trajectoire de ces balles. Plus la tôle sera proche de la trajectoire de la balle de cylindre mieux sera le tortillement devant.
- ✓ Soulevez la balle de cylindre gauche jusqu'à l'obtention du rayon souhaité. Cette valeur diffère suivant l'épaisseur nominale de la tôle, suivant son seuil de fluidité etc.
- ✓ Donner une forme à la tôle en faisant tourner les balles de cylindre.
- ✓ Lorsque la tôle est au-dessous de la balle de cylindre de droite soutenir la tôle en soulevant la balle. Faites descendre la balle gauche.

Continuer l'opération d'entortillage de la tôle en faisant tourner les balles.

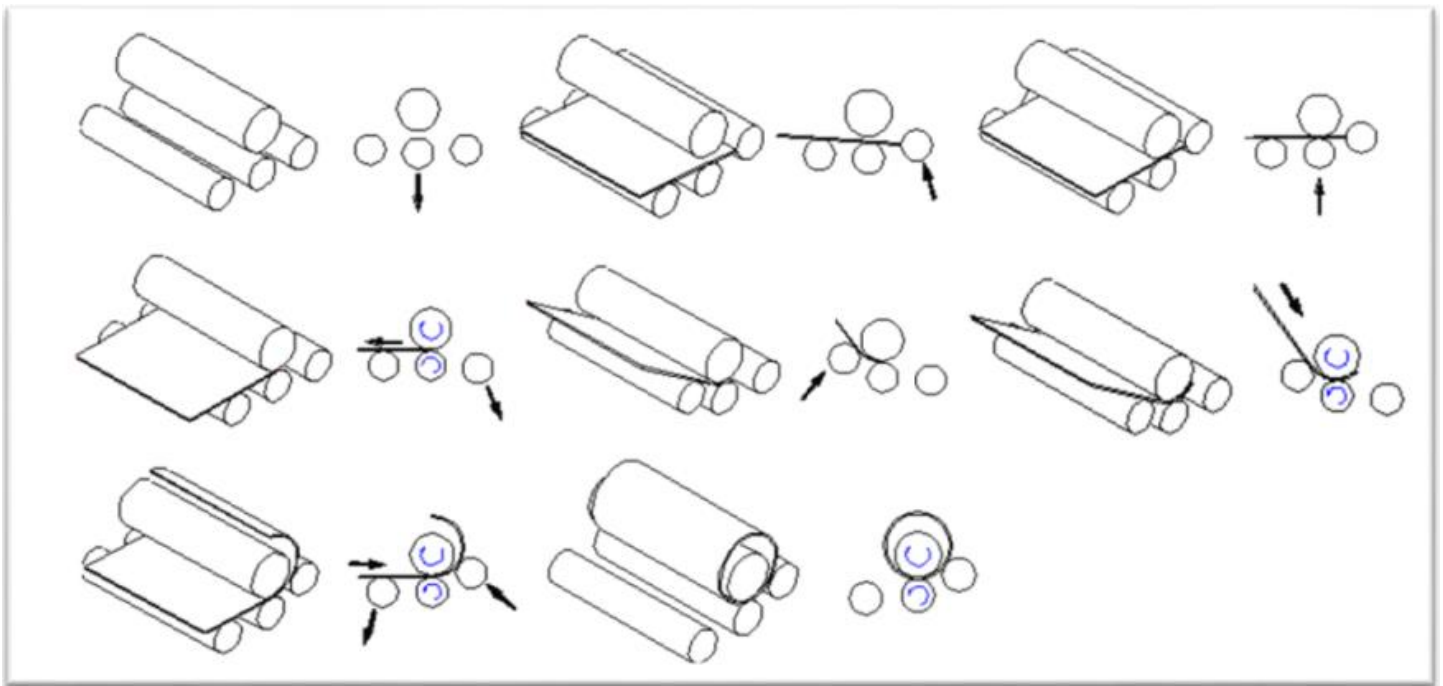


Fig. III. 2 :Étapes de formation.

III.5 Code de calcul utilisé

Plusieurs codes utilisent les approches incrémentales tels que : ABAQUS, STAMPACK IS-DYNA PAM-STAMP, RADIOSS, etc. Nous avons choisi d'utiliser le code EF ABAQUS, qui nous permet de manipuler facilement tous les paramètres du modèle EF (les caractéristiques géométriques, les propriétés du matériau, les paramètres du procédé, etc.).

ABAQUS est un logiciel généraliste de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu dans le milieu universitaire, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. A partir d'un fichier de données, qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées, et fournit les résultats dans un fichier.obd.

Le module CAE est l'interface graphique d'ABAQUS, il propose dix sous-modules : Sketch, Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load ,Mesh, Job et Visualisation. Les huit premiers sous- modules servent à définir le problème mécanique à simuler. Le module Job est celui qui gère le passage du calcul de simulation proprement dit. Enfin, le dernier module regroupe tout ce qui concerne l'exploitation des résultats sous forme de diverses visualisations.

Le logiciel ABAQUS comprend deux solveurs, le premier est ABAQUS /Standard qui utilise une méthode de résolution basé sur un algorithme statique implicite et le second est ABAQUS /Explicit qui utilise une méthode de résolution par un algorithme dynamique explicite. ABAQUS renferme une grande bibliothèque d'éléments finis qui peuvent moduler pratiquement la majorité des géométries. Il a également une liste étendue de modèles de matériaux qui peuvent simuler le comportement de la plupart des matériaux d'ingénierie, avec la possibilité de programmer de nouveaux éléments en FORTRAN et de nouvelles lois de comportement ainsi que la possibilité de remaillage automatique.

III.6 Simulation numérique de l'opération de roulage

Nous proposons dans cette partie de lister les différentes étapes nécessaires à la modélisation de l'opération de roulage. Le Tableau ci-dessous représente les caractéristiques géométriques et mécaniques des éléments utilisés dans cette simulation.

Tableau. III.1 :Caractéristiques géométriques et mécaniques des éléments de roulage.

Elément	Caractéristiques Géométriques	Caractéristiques physiques	Caractéristiques Mécaniques		
			Elastic	Plastic	
				Yield stress	Plastic strain
Tôle	3Dshell:670mm*500mm*5mm (Section Type shell homogeneous)	$\rho=7.8*10^9$ tonne/mm ³	E=210000MPa $\nu = 0.33$	250 300 350 400 450	0 0.1 0.2 0.3 0.4
Rouleau 1, 2, et 3	Discrete rigid, Rf, D=200mm	/	/	/	/

- **Choix de la méthode de résolution**

La méthode implicite est utilisée pour des modèles où on peut utiliser des temps d'incrémentes larges. Dans notre cas (modèles avec des contacts sévères), plusieurs tentatives sont lancées en utilisant la méthode implicite mais le calcul diverge après rotation du rouleau supérieur de quelques degrés. Cependant la méthode explicite est utilisée avec un grand succès.

- **Niveau de masse**

L'augmentation du niveau de masse "mass scaling" diminue le temps de calcul et donne une solution instable. Pour notre modèle nous avons choisi une valeur de 1000 pour ce paramètre.

- **Formulation du contact**

Cette étape s'avère la plus importante de toute la modélisation puisque la validité du modèle dépend énormément de la formulation des contacts. Pour notre modèle nous avons défini trois contacts type frottement avec un coefficient de frottement égale à 0,2.

- **Conditions aux limites**

Tout d'abord on crée un step nommé « cintrage » dont la méthode de résolution est « dynamique explicit ». Les conditions aux limites imposées dans ce système sont données dans la figure ci-dessous :

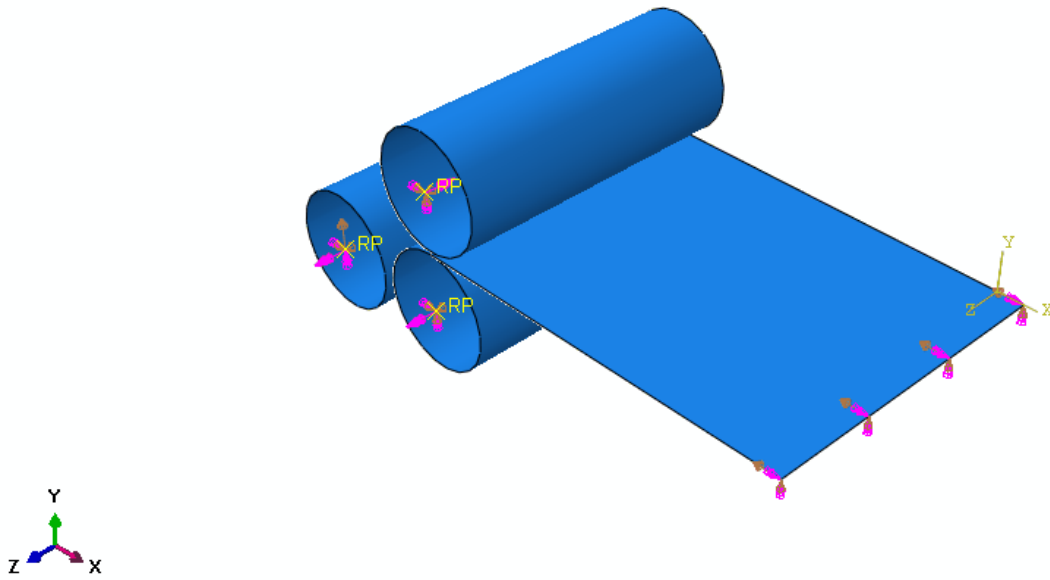


Fig. III.3 : Conditions aux limites appliquées dans le Step « Cintrage ».

Tableau III.2 : Condition aux limites adoptées.

Conditions aux limites	Tôle	Rouleau 1(Top)	Rouleau 2(Bottom)	Rouleau 3(Gauche)
BC-1	/	/	$V1=V2=V3=0$ $VR1=VR2=0$ $VR3=6.28\text{rd/s}$	/
BC-2	/	/	/	$V1=V3=0$ $V2=200\text{mm/s}$ $VR1=VR2=0$ $VR3=6.28\text{rd/s}$
BC-3	$V1=-300\text{mm/s}$ $V2=0$ $VR1=VR2=0$	/	/	/
BC-4	/	$V1=V2=V3=0$ $VR1=VR2=0$ $VR3=-6.28$	/	/

- Mesh

Tableau III.3 : Maillage de la structure.

Elément	Type de Maillage
Tôle	Structured, S4R
Rouleau 1, Rouleau 2, Rouleau 3	Free, R3D4

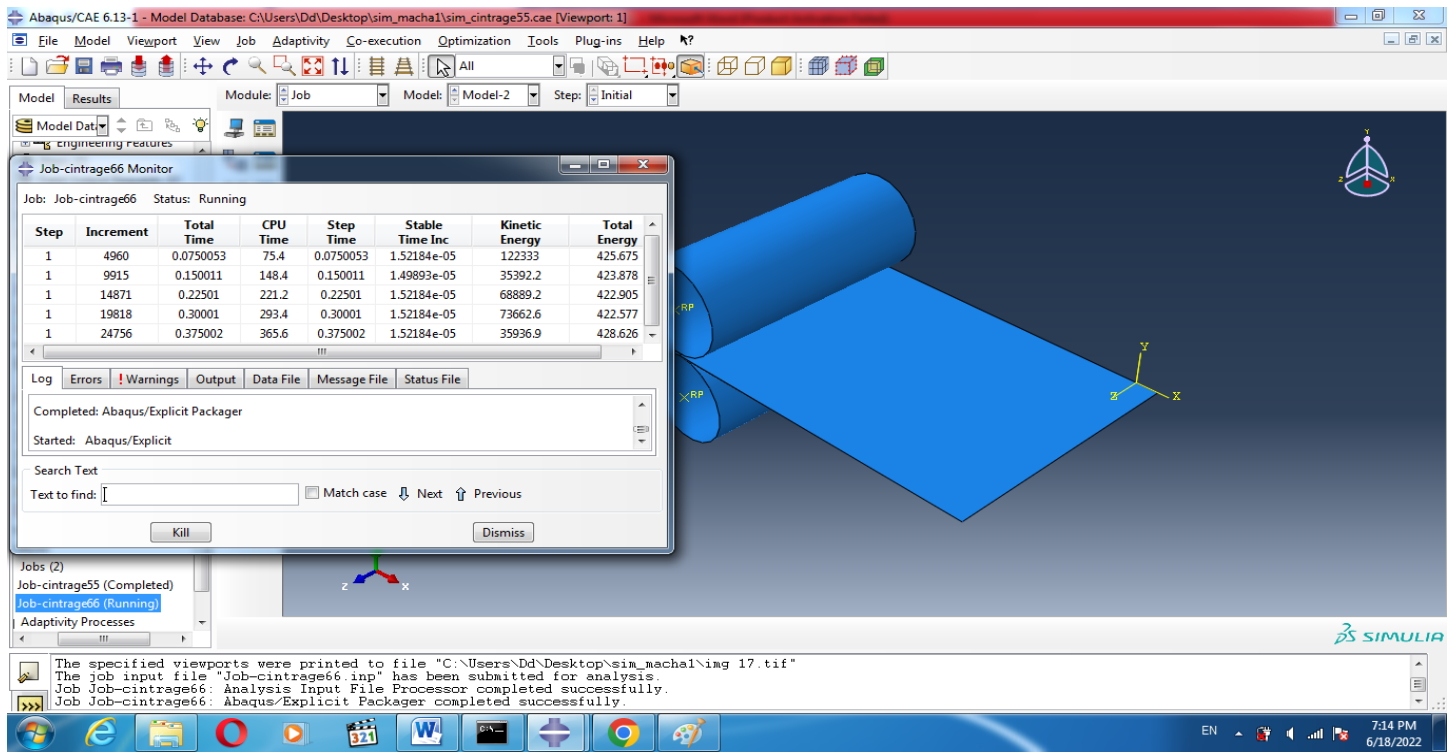


- Interaction

Contact	Step	Type de contact	Propriétés de contact
Tôle/Rouleaux	Rolling	General contact	-Hard contact -Coefficient de frottement $\nu=0.2$

- **Job**

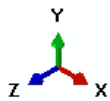
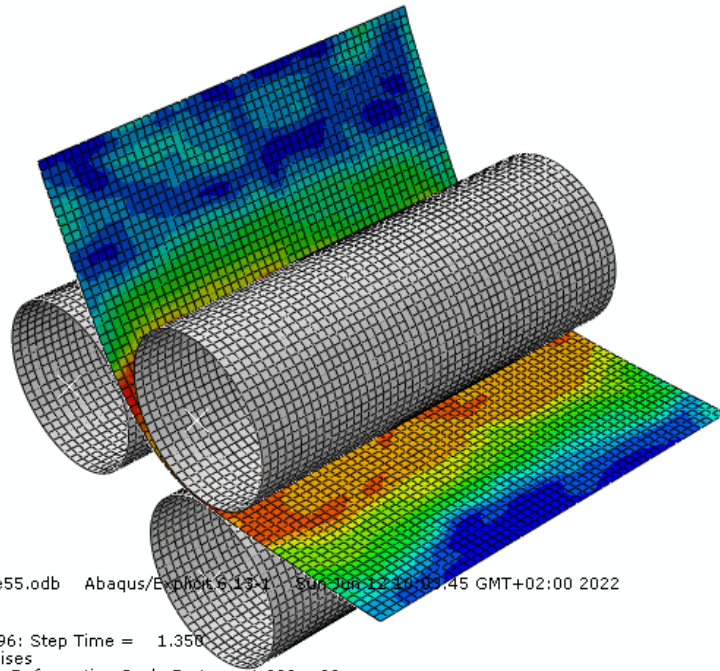
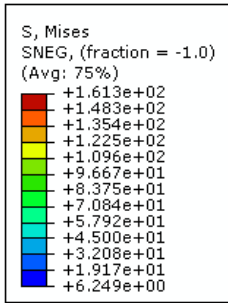
On crée un job pour lancer le calcul et obtenir des résultats.



- **Visualisation**

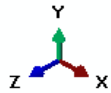
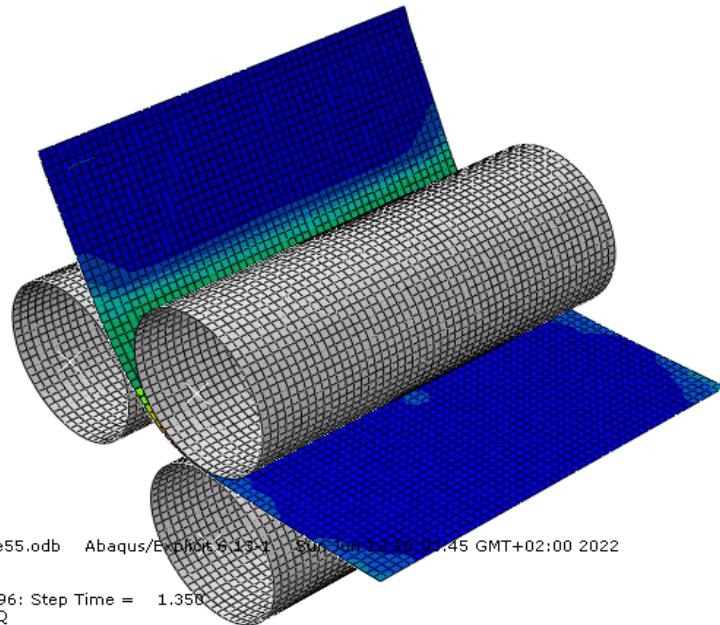
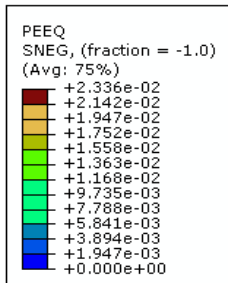
Dans ce module on peut visualiser les résultats de la simulation.

- **Contraintes de vonMises**



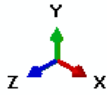
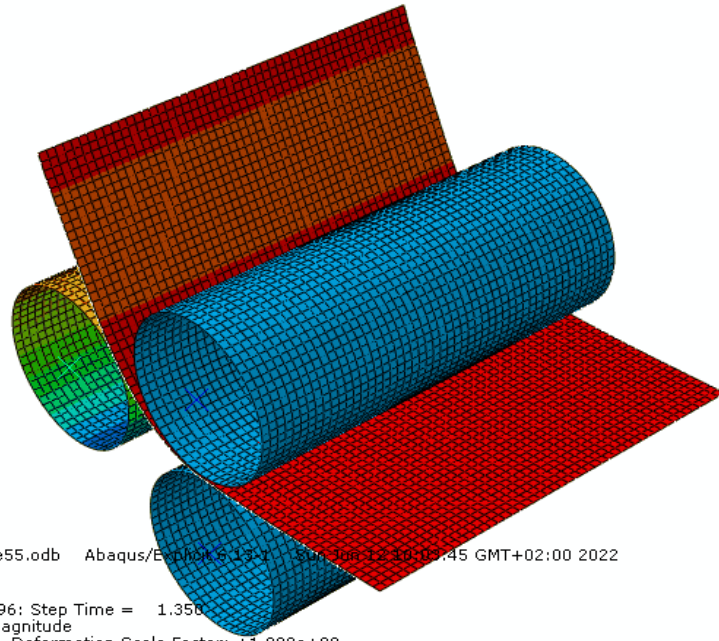
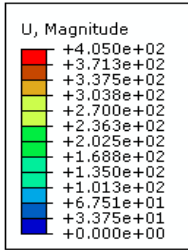
ODB: Job-cinrage55.odb Abaqus/Explicit 6.13.1 Sun Jun 12 10:07:45 GMT+02:00 2022
 Step: rolling
 Increment: 89696; Step Time = 1.350
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

- **Déformationséquivalentes**

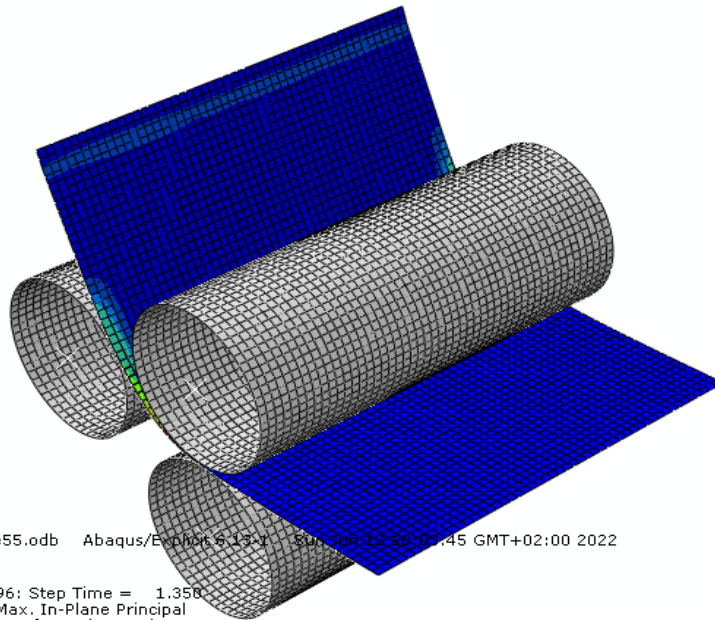
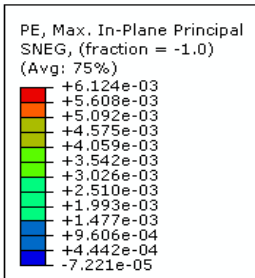


ODB: Job-cinrage55.odb Abaqus/Explicit 6.13.1 Sun Jun 12 10:07:45 GMT+02:00 2022
 Step: rolling
 Increment: 89696; Step Time = 1.350
 Primary Var: PEEQ
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

- Déplacements



- PE,max



Le logiciel nous permet encore de tracer des courbes décrivant l'évolution de différents paramètres. Par exemple, la figure III.3 représente l'évolution dynamique de la force appliquée par le rouleauG sur la tôle.

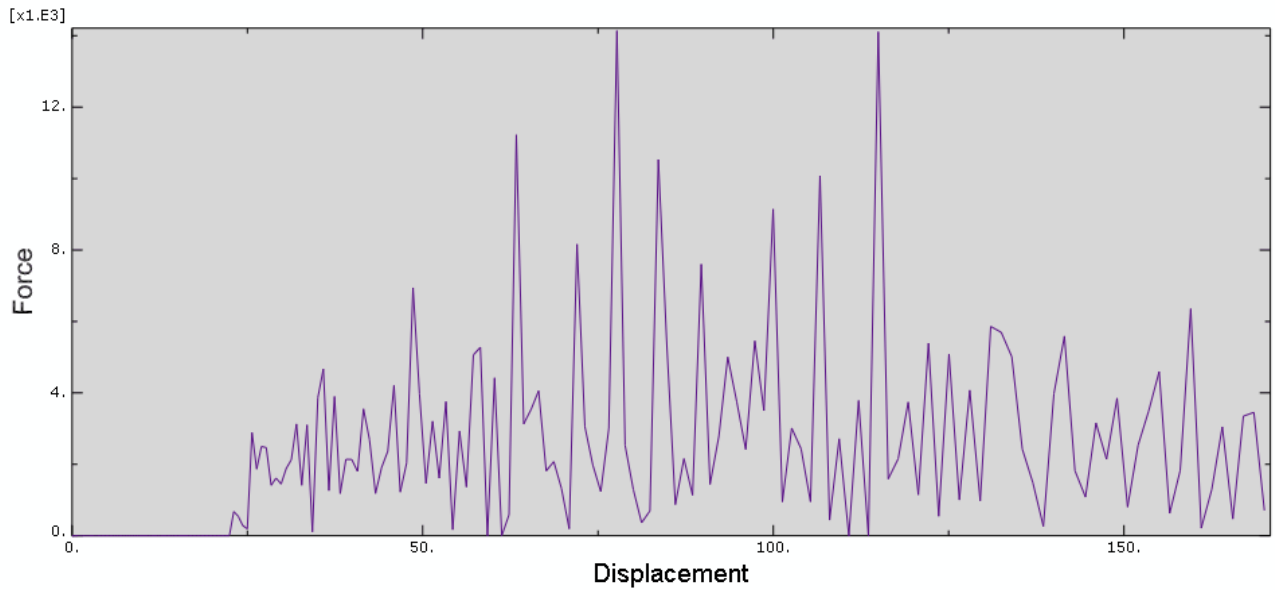


Fig. III.4: Evolution de la force RF du rouleauG sur la tôle.

De même pour l'évolution de la contrainte équivalente de vonMises en fonction de la déformation équivalente, Figure.III.4.

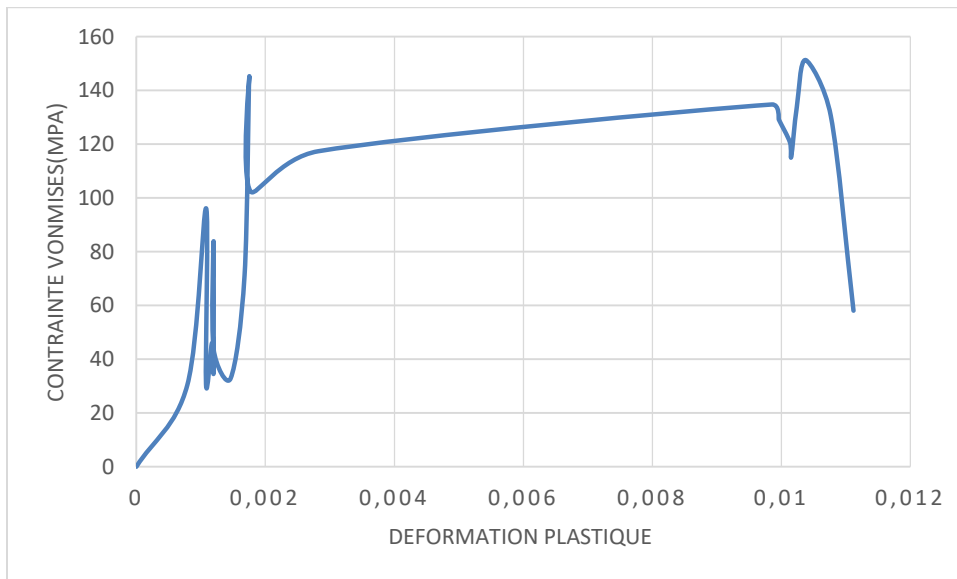


Fig. III.5 : Evolution de la contrainte de vonMises en fonction de la déformation équivalente.

Pour étudier la variation de la contrainte suivant un trajet bien défini, on a choisi un trajet quelconque (path1).

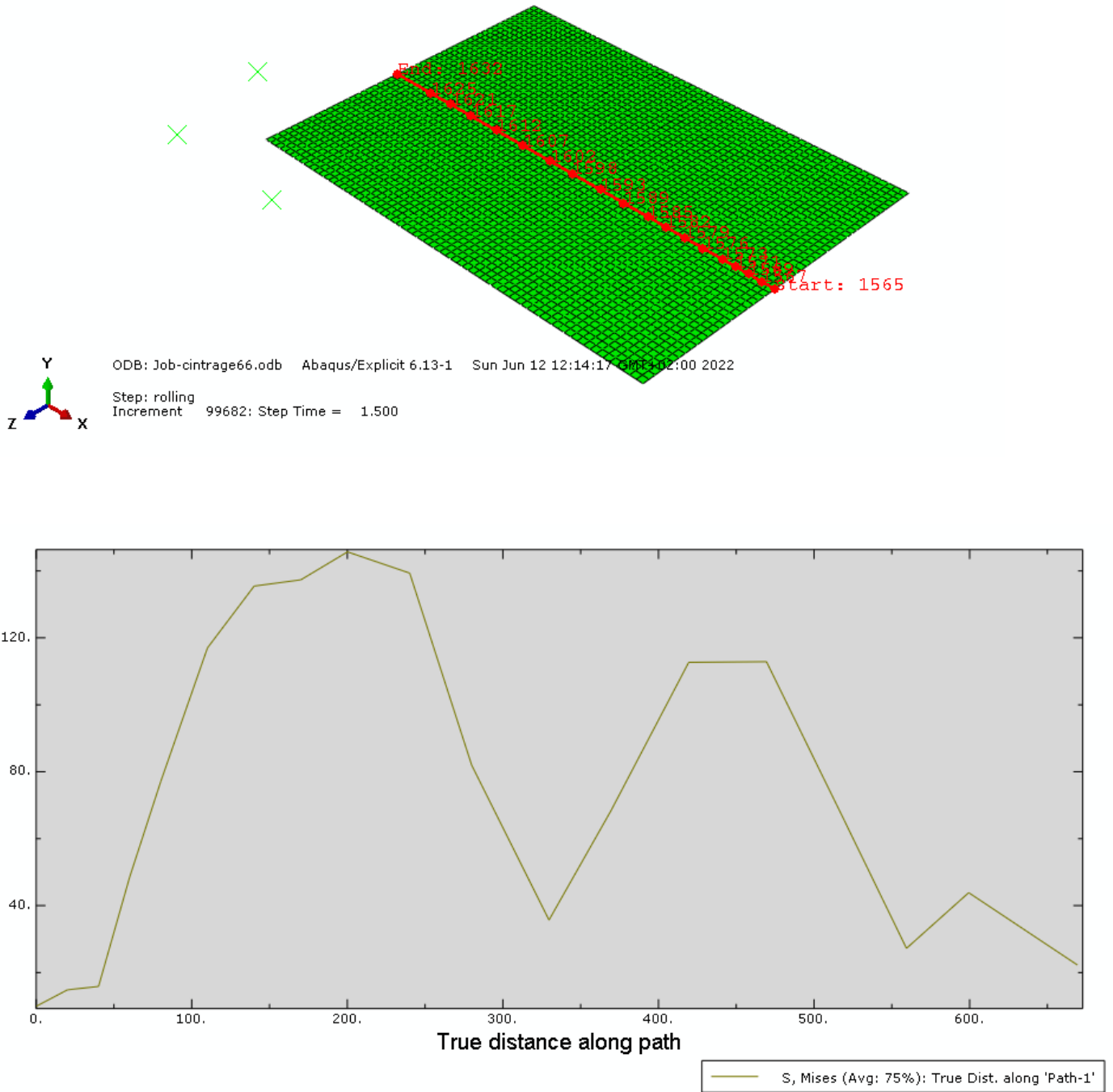


Fig. III.6 : Variation de la contrainte équivalente suivant un trajet bien défini (Path1).

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons abordé la simulation numérique d'une opération de roulage d'une tôle en acier. Les propriétés géométrique, physiques et mécaniques ont été introduites et elles ne représentent pas vraiment des données réelles d'une structure d'un pipeline utilisé pour le transport des hydrocarbures. Cette simulation n'est qu'une étape de démonstration d'une opération de mise en forme par déformation plastique utilisée généralement pour l'obtention des tubes ou des pièces cintrées. Le plus important dans ce travail est bien la maîtrise de la simulation et de la modélisation des structures mécaniques par la méthode des éléments finis en utilisant des logiciels industriels très puissants pour l'analyse et le calcul des structures quelque soit la complexité du problème posé dans le secteur industriel.

Dans cette étude, on a bien adopté la méthode de résolution dynamic/explicit vu que le problème est fortement non linéaire et les déformations sont importantes dans un temps de simulation très court.

Le logiciel nous a permis d'obtenir pas mal de résultats numériques qui caractérisent la déformabilité de la structure étudiée soit par des légendes ou soit par des courbes démonstratives indiquant l'évolution des paramètres résultats en fonction des paramètres d'influence, par exemple : Contrainte-Déformation, Force-Déplacement, Contrainte-Trajectoire donné (Path), etc.

L'entreprise ALPHAPIPE Ghardaïa nous a fournis quelques documents importants sur les aciers utilisés dans la fabrication des pipes pour hydrocarbures et les essais mécaniques adoptés pour la caractérisation mécanique. On aurait aimé de faire un petit stage dans cette entreprise pour avoir plus de résultats sur le plan expérimental mais malheureusement on n'a pas eu un avis favorable pour l'accès à cette entreprise.

Enfin, ce manuscrit peut être considéré comme un support pédagogique pour la simulation numérique de la mise en forme des métaux par déformation plastique notamment pour des structures fortement non linéaires.

Bibliographes

Bibliographes

- [1] DIRECTION DE LA PRODUCTION ET DU TRANSPORT DU GAZ. GAZODUC D'ALIMENTATION EN GAZ DE SOUASSI ET D'EL JEM. Société Tunisienne de l'électricité et du Gaz .ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT .MAI 2006.
- [2] Luc JOIN-LAMBERT, "generalites sur le transport international du gaz"., (1995).
- [3]Ahmed MOKHTARI, "de l'intervention sur pipeline-methodes, procedures et moyens",SONATRACH / TRC / RTC(2005).
- [4]Forty-First edition API 5L, specification for line pipe, April 1995.
- [5]Belaid Salim, analyse de la fiabilité de l'acier API 5L X60 pour pipelines corrodés modèle basé sur le critère B31G, mémoire du magister (science des matériaux), Université Abou BekerBelkaid Tlemcen, 03 mars 2008.
- [6]J.Vincent-Genod. (1989). Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation. Institut Français du pétrole. Société des éditions technique Paris
- [7]A. Bouziane,Contribution à la détermination des critères des qualités des tubes soudent soumis à une pression intérieure. Thèse de Magistère en génie mécanique, Université M'Hamed BougaraBoumerdes, 2007/2008.
- [8]A. Benmoussat, Etude sur la corrosion des aciers HLE pour canalisations de gaz à haute pression, thèse de doctorat, université Mohamed Boudiaf (USTO-MB), ORAN 2006.
- [9]
- [10]Modélisation de l'essai Charpy : application à la transition, ductile–fragile d'un acier bainitique 16MND5, B. Tanguy, J. Besson, A. Pineau Centre des Matériaux, École des Mines de Paris, UMR CNRS 7633, BP 87 Evry cedex 91003.
- [11] Jean-Pierre Jansen.Aciers, tubes et pièces de forme cours rédiger par monsieur Jansen 3.21 erpartie intervenant responsable recherche développement produit société EUROPIPE.
- [12]J.M Gray and Poutremoli M, (1987). Metallurgical options for API grade X70 and X80line pipe. In international conference: pipe technology.
- [13]AhmedMokhtari, L'intervention sur pipeline-méthodes, procédures et moyens, SONATRACH / TRC / RTC(2005).
- [14]George A. Antaki. Piping and Pipeline Engineering Design, Construction, Maintenance, Integrity,and Repair. Aiken, South Carolina, U.S.A 2003.
- [15] Gérard Béranger (Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), Membre de l'Académie des Technologies) et Henri Mazille(Professeur Émérite à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

(INSA)). Revêtements et traitements de surface, Approche technologique, SNDL, Technique de l'ingénieur. Doc M1426

[16] S. Ben Soltane, Etude électrochimique de la corrosion des aciers API 5L X60 pour gazoduc en milieu environnant de sol et protection par inhibiteurs à base de Polyphosphates, mémoire de magister, université USTO MB Oran, Avril 2009.

[17] documentation ALFAPIPE GHARDAIA.

[18] Xing W R. Status and development of bending machine for plate, China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology 45(2) (2010) 10-16

[19] Hua M, Lin Y H. Large deflection analysis of elastic plate in steady continuous four-roll bending process, International Journal of Mechanical Science 41 (12) (1999) 1461-1483.

[20] Chen Y X. Principle and Method of Sheet Metal Bending and Springback, National Defense Industry Press, Beijing, 1990.

[21] www.google.com