

N° d'ordre :...../ Faculté / UMBB / 2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**

**Mémoire de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme :**

**MASTER**

**Domaine : Science et Technologie.**

**Filière : Hydrocarbures.**

**Spécialité : Génie mécanique : Mécanique des Chantiers Pétroliers.**

**Thème**

**Etudes expérimentale et numérique de la propagation de fissure  
dans les joints soudés**

**(Acier de pipeline API 5L X70)**

**Réalisé par : YAHIA CHERIF Moundji**

**RAACH Youcef**

**Devant le jury :**

|                      |                         |      |              |
|----------------------|-------------------------|------|--------------|
| Aissani Slimane      | professeur              | UMBB | Président    |
| GACEB Mohamed        | Professeur              | UMBB | Encadreur    |
| BETTAHAR Kheireddine | Attaché de<br>recherche | CRTI | Co-Encadreur |
| Guebli Abdelhamid    | M C .B                  | UMBB | Examineur    |
| Hatref               | M C .A                  | UMBB | Examineur    |

Année universitaire 2015 / 2016

*« Je suis de ceux qui pensent que la science a une grande beauté. Un savant, c'est un enfant placé en face des phénomènes naturels qui l'impressionnent comme un conte de fées. »*

Marie Curie, 1933

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة انتشار الشروخ في مفصل الملحومة للصلب API 5L X70 المستخدم لنقل النفط و الغاز الطبيعي. هذه الدراسة تتضمن تحديد الخصائص المجهريّة و الميكانيكية من شد و صلابة. اخضاع عينة SENT مع شق في المنطقة المتضررة حراريا من جانب الجذر لعملية شد من اجل متابعة حقول التشريد والتشوهات باستعمال تقنية ارتباط الصور الرقمية التي تتيح لنا فهم سلوك الشروخ في مفصل الملحومة.

الكلمات المفتاحية : انتشار الشروخ, مفصل الملحومة, SENT, المنطقة المتضررة حراريا , API 5L X70

## Abstract

The aim of this work is the study of crack propagation in the welded joint of API 5L X70 steel pipeline used for oil and gas transport. This study includes microstructural and mechanical characterization based on tensile and hardness tests. A SENT specimen with a notch in the HAZ in the root side of the weld has been subjected to tensile test to monitor the displacements and strain fields using digital image correlation techniques that allow understanding of the crack propagation behaviour in the weld bead

Key words: crack propagation, welded joint, SENT, HAZ, API 5L X70.

## Résumé

Le but de ce travail est l'étude de la propagation de fissure dans le joint soudé de l'acier API 5L X70 utilisé en pipelines pour le transport du pétrole et du gaz naturel. Cette étude inclue une caractérisation microstructurale et mécaniques de traction et de dureté. Un essai de traction est conduit sur une éprouvette SENT entaillée en ZAT du côté de la racine afin de suivre l'évolution des champs de déplacements et de déformations par la technique de la corrélation d'image numérique. Ceci nous a permis de comprendre le comportement de la propagation de fissure dans le cordon de soudure.

Mots clé : propagation de fissure, joint soudé, SENT, ZAT, API 5L X70

# *Remerciement*

*Avant toute chose, nous tenons à remercier ALLAH qui nous a facilité la tâche et nous a donné la force afin de réaliser ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer toutes nos gratitude à notre encadreur monsieur **GACEB Mohamed** Professeur à la faculté des hydrocarbures et de la chimie de Boumerdes, pour avoir pris la responsabilité de diriger ce travail ainsi pour sa patience, son aide, sa disponibilité et ses conseils avisés.*

*Nos remerciements bien entendu s'adressent à notre Co-encadreur monsieur **BETTAHAR Kheireddine** Attaché de recherche au Centre de Recherche en Technologies Industrielles, qui nous a proposé le sujet et assuré sa bonne direction, pour ses précieux conseils sa disponibilité malgré son plan chargé, il a toujours su trouver le temps nécessaire pour nous aider.*

*Nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à tout le cadre professoral et administratif du CRTI et spécialement monsieur **BRICK CHAOUCH Amine**.*

*Nos profonds remerciements vont à monsieur **ABED** chef atelier mécanique à la faculté des sciences de l'ingénieur de Boumerdes, qui nous a aidés à la réalisation de ce travail.*

*Nous adressons nos très sincères remerciements aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire, leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.*

*Nos remerciements vont à tous les professeurs et enseignants du département de transport et équipements des hydrocarbures.*

*Nos remerciements vont enfin à nos familles, nos amis et à tous ce qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail aux deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à savoir mon père et ma mère. Je leur dis :*

*Merci maman pour ta patience, ton courage et ton sacrifice pour moi. Avec toute ma fidélité et tout mon amour pour toi, ma belle, mon plus meilleur cadeau dans cette vie, je ne pourrai jamais égaler ton mérite.*

*Merci cher père du fond de mon cœur pour ton éducation, ton sacrifice, ton assistance et pour ce que tu m'as fait et qui m'a permis d'avoir cette réussite et ce bonheur. Je te dis merci et mille fois merci.*

*A ma grand-mère, ma seconde mère, la source de tendresse, qui a été toujours à mes côtés pour m'encourager et me soutenir dans tous les moments.*

*A toute ma famille, cet ensemble de personnes qui forment comme une forteresse au fond de moi et où je peux se réfugier à tout moment.*

*A mon binôme, Youcef avec lequel j'ai partagé mes meilleurs souvenirs.*

*A tous mes meilleurs amis et mes collègues du groupe MACP11,*

*A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire,*

*à tous ceux qui m'aiment et que j'aime et à tous ceux qui par un simple mot ou geste m'ont aidé et m'ont encouragé tout au long ma vie.*

*Moundji*

# *Dédicace*

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce mémoire de master à :*

*Ma mère qui représente pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'est pas cessé de m'encourager et de me donner l'espoir. Ce travail est le fruit de tes sacrifices.*

*Mon père : aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.*

*Ma petite sœur qui je l'aime énormément.*

*L'âme de mon oncle Ahmed Que Allah lui pardonne tous ses péchés inch'Allah et qu'il l'accueille dans le Jenna.*

*Ma grande mère que Dieu l'accepte dans son vaste paradis.*

*Mon binôme Moundji pour sa patience et son esprit de collaboration.*

*Mes amis Faissal, Wail, Lakhdar, Amine et tous mes amis de promo 2011.*

*Toute la famille RAACH et LASBAT.*

*Youcef*

# Sommaire

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et des abréviations

**Introduction générale.....01**

## Partie I : Recherche bibliographique

### CHAPITRE I : ACIERS A HAUTE LIMITE ELASTIQUE DES PIPELINES

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1. Introduction.....                                                 | 03 |
| I.2. Historiques et technologie des pipelines.....                     | 05 |
| I.3. Construction des pipelines.....                                   | 06 |
| I.3.1. Les tubes soudés sous forme spirale.....                        | 07 |
| I.3.2. Les tubes soudés sous forme longitudinale :.....                | 08 |
| I.3.3. Les tubes réalisés sans soudure.....                            | 08 |
| I.4. Les aciers à haute limite élastique.....                          | 09 |
| I.4.1. Définition des aciers HLE : .....                               | 09 |
| I.4.2. Les aciers HSLA catégories et caractéristiques.....             | 09 |
| I.4.2.1. Les aciers HSLA résistants à la corrosion atmosphérique ..... | 09 |
| I.4.2.2. Les aciers microalliés ferrito-perlitique .....               | 10 |
| I.4.2.3. Les aciers perlitiques de construction laminés .....          | 11 |
| I.4.2.4. Les aciers de ferrite aciculaire .....                        | 11 |
| I.4.2.5. Les aciers à double phase (dual phase) .....                  | 13 |
| I.4.2.6. Les aciers de forme d'inclusion contrôlée .....               | 13 |
| I.4.3. Propriétés des aciers HSLA.....                                 | 13 |
| I.4.3.1. Éléments de microalliage .....                                | 13 |
| I.4.3.2. Composés : carbures, nitrures, oxydes .....                   | 14 |
| I.4.3.3. Propriétés propres à chaque élément .....                     | 14 |
| I.4.3.4. L'effet des éléments de microalliage sur les propriétés ..... | 15 |
| I.4.4. Propriétés mécaniques des aciers HSLA.....                      | 15 |
| I.4.5. Comportement plastique des aciers HSLA .....                    | 16 |
| I.4.5.1. Durcissement par solution : .....                             | 16 |

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| I.4.5.2. Durcissement par dispersion de précipités ..... | 17 |
| I.4.5.3. Durcissement par joints de grains .....         | 17 |
| I.4.5.4. Durcissement par dislocations.....              | 17 |
| I.4.6. Résistance à l'usure des aciers HSLA .....        | 18 |
| I.4.7. Résistance à la corrosion.....                    | 19 |

## **CHAPITRE II : TECHNIQUES DU SOUDAGE**

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| II.1. Introduction .....                                  | 20 |
| II.2. Définition du soudage.....                          | 21 |
| II.3. Classification des procédés du soudage.....         | 21 |
| II.4. Etat de l'art.....                                  | 22 |
| II.5. Comparaison des différents procédés du soudage..... | 23 |
| II.5.1. Comparaison des rendements thermiques .....       | 23 |
| II.5.2. Comparaison des énergies spécifiques.....         | 23 |
| II.6. Différents aspect du soudage.....                   | 24 |
| II.6.1. Aspect thermique du soudage.....                  | 24 |
| II.6.2. Cycle thermique du soudage.....                   | 24 |
| II.6.3. Aspect métallurgique du soudage .....             | 25 |
| II.7. Morphologie d'un cordon de soudure .....            | 25 |
| II.8. Types des soudures .....                            | 26 |
| II.9. Les défauts du soudage .....                        | 27 |
| II.10. Le soudage à l'arc submergé .....                  | 28 |
| II.11. Le soudage TIG .....                               | 29 |
| II.11.1. Définition .....                                 | 29 |
| II.11.2. Procédé.....                                     | 30 |
| II.11.3. Matériels.....                                   | 31 |
| II.11.4. Domaines .....                                   | 34 |
| II.11.5. Avantages et inconvénients du soudage TIG .....  | 34 |
| II.12. La soudabilité des tubes en acier x70 .....        | 35 |

## **CHAPITRE III : COMPORTEMENT DU MATERIAU**

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| III.1. Introduction.....          | 37 |
| III.2. Les essais mécaniques..... | 37 |
| III.2.1. L'essai de traction..... | 37 |

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| III.2.1.1. La courbe de traction.....                    | 39 |
| a) La courbe conventionnelle.....                        | 39 |
| b) La courbe rationnelle.....                            | 40 |
| c) Le passage de la force à la contrainte vraie.....     | 40 |
| d) Le passage du déplacement à la déformation varie..... | 41 |
| III.2.2. L'essai de dureté.....                          | 41 |
| III.3. Types des comportements mécaniques.....           | 42 |
| III.3.1. Comportement élastique.....                     | 42 |
| III.3.2. Comportement plastique.....                     | 43 |
| III.4. Les classes de matériaux et leurs propriétés..... | 43 |

## **Partie II : partie expérimentale**

### **CHAPITRE IV : MATERIELS ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| IV.1. Introduction.....                         | 44 |
| IV.2. Soudage de tubes.....                     | 44 |
| IV.3. Mode de prélèvement de l'échantillon..... | 44 |
| IV.4. Caractérisation métallographique.....     | 45 |
| IV.4.1. Préparation de l'échantillon.....       | 45 |
| IV.4.2. Polissage de l'échantillon.....         | 45 |
| IV.4.2.1. Polissage grossier.....               | 45 |
| IV.4.2.2. Polissage de finition.....            | 47 |
| IV.4.3. Révélation de la microstructure.....    | 47 |
| IV.4.4. L'attaque chimique au Nital.....        | 47 |
| IV.4.5. Observation microscopique.....          | 47 |
| IV.4.5.1. Principe de fonctionnement.....       | 48 |
| IV.5. Caractéristiques mécaniques.....          | 48 |
| IV.5.1. L'essai de traction.....                | 48 |
| IV.5.1.1. La Réalisation d'essai.....           | 48 |
| IV.5.2. L'essai de la dureté.....               | 50 |
| IV.5.2.1. La réalisation de l'essai.....        | 50 |
| IV.6. La corrélation d'images.....              | 51 |
| IV.6.1. Principe.....                           | 51 |
| IV.6.2. Démarche de l'essai.....                | 53 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.6.2.1. Essai de traction sur éprouvette non-fissurée.....             | 53 |
| IV.6.2.2. Essai de traction sur éprouvette avec fissure dans la ZAT..... | 53 |
| IV.6.2.3. Essai de traction sur éprouvette avec fissure dans la ZF.....  | 53 |
| IV.6.3. Procédure de la méthode de corrélation d'image.....              | 54 |
| IV.6.3.1. Différentes étapes de la méthode.....                          | 54 |

## **CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| V.1. Présentation du matériau utilisé.....                                        | 57 |
| V.1.1. Métallographie.....                                                        | 57 |
| V.1.1.1. Analyse chimique.....                                                    | 57 |
| V.1.1.2. Macrographie de la soudure.....                                          | 57 |
| V.1.1.3. Microstructure.....                                                      | 57 |
| V.2. Caractéristiques mécaniques.....                                             | 59 |
| V.2.1. Essai de dureté.....                                                       | 59 |
| V.2.1.1. Estimation des propriétés de traction à partir des essais de dureté..... | 61 |
| V.2.2. Essai de traction monotone.....                                            | 62 |
| V.2.2.1. Résultats données par la machine de traction.....                        | 63 |
| a) Epreuve soudée non entaillée.....                                              | 63 |
| b) Epreuve soudée fissurée en zone fondue.....                                    | 65 |
| c) Epreuve soudée entaillée en zone affectée thermiquement.....                   | 66 |
| V.2.2.2. Résultats obtenues par corrélation d'images numériques.....              | 68 |
| V.2.2.2.1. Epreuve soudée non fissurée.....                                       | 68 |
| ❖ Etude du comportement plastique uniforme.....                                   | 68 |
| • Vecteurs de déplacement.....                                                    | 68 |
| • Cartographies de déplacement longitudinal.....                                  | 69 |
| • Cartographies de déplacement transversal.....                                   | 69 |
| • Cartographies de déformation longitudinale.....                                 | 70 |
| • Les déformations locales au niveau du métal de base et la zone fondue.....      | 72 |
| ❖ Etude de l'évolution de la striction de l'éprouvette soudée.....                | 72 |
| • Vecteurs de déplacement.....                                                    | 72 |
| • Cartographies de déplacement.....                                               | 73 |

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| • Cartographies et courbes de déformation longitudinale..... | 74        |
| V.2.2.2.2. Eprouvette soudée entaillée en ZAT.....           | 76        |
| • Vecteurs de déplacement.....                               | 76        |
| • Cartographie de déplacement.....                           | 77        |
| • Cartographies déformation.....                             | 77        |
| <b>Conclusion générale et perspectives.....</b>              | <b>79</b> |
| <b>Références bibliographiques</b>                           |           |

# Liste des figures

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.1 :</b> Développement des pipelines (composition, procédé TMCP microstructure, API grade).....            | 03 |
| <b>Figure I.2 :</b> Pipelines.....                                                                                    | 04 |
| <b>Figure I.3 :</b> Réseau de transport par canalisation.....                                                         | 04 |
| <b>Figure 1.4:</b> Développement des pipelines en acier à haute résistance dans le temps, grade et mise en forme..... | 06 |
| <b>Figure I.5 :</b> De la plaque au tube.....                                                                         | 06 |
| <b>Figure I.6 :</b> Procédé de production des tubes soudés en spirale.....                                            | 07 |
| <b>Figure I.7 :</b> Photos de la mise en forme des tubes par le procédé « UOE ».....                                  | 08 |
| <b>Figure I.8 :</b> Obtention des tubes sans soudure.....                                                             | 08 |
| <b>Figure II.1:</b> classification des procédés du soudage.....                                                       | 21 |
| <b>Figure II.2 :</b> Comparaison de l'énergie spécifique des différents procédés.....                                 | 24 |
| <b>Figure II.3 :</b> $\theta = f(t)$ , Faisceau de courbes de cycle thermique.....                                    | 25 |
| <b>Figure II.4 :</b> $\theta = f(x)$ répartition de température dans la soudure.....                                  | 25 |
| <b>Figure II.5 :</b> Différentes parties d'un joint soudé.....                                                        | 26 |
| <b>Figure II.6 :</b> Fissuration dans les joints soudés.....                                                          | 27 |
| <b>Figure II.7 :</b> Procédé de soudage à l'arc submergé SAW.....                                                     | 29 |
| <b>Figure II.8 :</b> Torche de soudage TIG.....                                                                       | 31 |
| <b>Figure III.1 :</b> Principe d'essai de traction.....                                                               | 37 |
| <b>Figure III.2 :</b> Courbe théorique de la traction.....                                                            | 38 |
| <b>Figure III.3 :</b> Variation de la longueur de l'éprouvette pendant l'essai de traction.....                       | 39 |
| <b>Figure III.4 :</b> Principe d'essai de dureté.....                                                                 | 42 |
| <b>Figure IV.1 :</b> Représentation schématique du mode de prélèvement d'échantillon d'un tube soudé.....             | 44 |
| <b>Figure IV.2:</b> polisseuse MECATECH 334 (LRFEPM/FHC).....                                                         | 46 |
| <b>Figure IV.3 :</b> polisseuse STRUERS (DMM/CRTI).....                                                               | 46 |
| <b>Figure IV.4:</b> Microscope optique (Laboratoire de métallurgie et mécanique du CRTI).....                         | 47 |
| <b>Figure IV.5 :</b> Machine de l'essai de traction de type INSTRON.....                                              | 49 |
| <b>Figure IV.6 :</b> Courbe conventionnelle de traction.....                                                          | 49 |
| <b>Figure IV.7 :</b> Eprouvettes de l'essai de traction.....                                                          | 50 |
| <b>Figure IV.8 :</b> Machine universelle de dureté INOVATEST NEMISIS 9000.....                                        | 50 |

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure IV.9 :</b> Mesure Principe de dureté Vickers.....                                                                       | 51 |
| <b>Figure IV.10 :</b> Schéma de principe de la technique de corrélation d'images.....                                             | 52 |
| <b>Figure IV.11.a) :</b> Image référence (initiale).....                                                                          | 52 |
| <b>Figure IV.11.b) :</b> Image déformée (actuelle).....                                                                           | 52 |
| <b>Figure IV.12 :</b> Epreuve de traction soudée non fissurée.....                                                                | 53 |
| <b>Figure IV.13 :</b> épreuve de traction avec fissure dans la ZF.....                                                            | 53 |
| <b>Figure IV.14 :</b> épreuve de traction avec fissure dans la ZAT.....                                                           | 53 |
| <b>Figure V.1 :</b> Macrographie de la soudure.....                                                                               | 56 |
| <b>Figure V.2:</b> Microstructure du métal de base.....                                                                           | 56 |
| <b>Figure V.3 :</b> Microstructure de la zone fondue à la racine du cordon.....                                                   | 57 |
| <b>Figure V.4 :</b> Microstructure de la zone fondue au milieu du cordon.....                                                     | 57 |
| <b>Figure V.5 :</b> Microstructure de la zone fondue à la zone de finition du cordon.....                                         | 57 |
| <b>Figure V.6 :</b> Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT).....                                                   | 58 |
| <b>Figure V.7 :</b> Positions des mesures de dureté à travers le joint soudé.....                                                 | 58 |
| <b>Figure V.8 :</b> Histogramme de la dureté Vickers (Hv) par zone.....                                                           | 59 |
| <b>Figure V.9.a) :</b> Histogrammes des propriétés de traction (valeurs estimées à partir de la dureté).....                      | 60 |
| <b>Figure V.9.b) :</b> Histogrammes des propriétés de traction de la zone fondue ZF (valeurs estimées à partir de la dureté)..... | 61 |
| <b>Figure V.10.a) :</b> Epreuve soudée non entaillée.....                                                                         | 62 |
| <b>Figure V.10 b) :</b> Epreuve non entaillée après la rupture.....                                                               | 62 |
| <b>Figure V.11:</b> Diagramme donné par la machine.....                                                                           | 63 |
| <b>Figure V.12 :</b> Courbes de traction conventionnelle/rationnelle.....                                                         | 63 |
| <b>Figure V.13.a) :</b> Epreuve entaillée dans la zone fondue.....                                                                | 64 |
| <b>Figure V.13.b) :</b> Epreuve entaillée en ZF après la rupture.....                                                             | 64 |
| <b>Figure V.14 :</b> Diagramme donné par la machine.....                                                                          | 65 |
| <b>Figure V.15 :</b> Courbes de traction rationnelle/conventionnelle.....                                                         | 65 |
| <b>Figure V.16.a) :</b> Epreuve entaillée dans la ZAT.....                                                                        | 65 |
| <b>Figure V.16.b) :</b> Epreuve entaillée en ZAT après la rupture.....                                                            | 65 |
| <b>Figure V.17 :</b> Diagramme donné par la machine.....                                                                          | 66 |
| <b>Figure V.18 :</b> Courbes de traction conventionnelle/rationnelle.....                                                         | 66 |
| <b>Figure V.19 :</b> Evolution des vecteurs de déplacement.....                                                                   | 67 |
| <b>Figure V.20 :</b> Représentation des cartographies de déplacement longitudinale (V).....                                       | 68 |
| <b>Figure V.21 :</b> Représentation des cartographies de déplacement transversal (U).....                                         | 69 |

|                                                                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure V.22.a) : Cartographies de déformation longitudinale .....</b>                                                 | <b>70</b> |
| <b>Figure V.22.b) : Partie plastique uniforme.....</b>                                                                   | <b>70</b> |
| <b>Figure V.23 : Courbes de déformation <math>\epsilon_{yy}</math>.....</b>                                              | <b>71</b> |
| <b>Figure V.24 : Déformation longitudinale locale de la zone fondue et le métal de base.....</b>                         | <b>71</b> |
| <b>Figure V.25 : Vecteurs de déplacement à travers l'éprouvette pendant la striction.....</b>                            | <b>72</b> |
| <b>Figure V.26 : Cartographies de déplacement transversal.....</b>                                                       | <b>73</b> |
| <b>Figure V.27 : Cartographies de déplacement longitudinal.....</b>                                                      | <b>73</b> |
| <b>Figure V.28 : Courbes de déplacement longitudinal.....</b>                                                            | <b>73</b> |
| <b>Figure V.29 : cartographies de déformation longitudinale <math>\epsilon_{yy}</math> le long de la zone utile.....</b> | <b>74</b> |
| <b>Figure V.30 : Courbes déformation longitudinale <math>\epsilon_{yy}</math>.....</b>                                   | <b>74</b> |
| <b>Figure V.31 : Courbes déformation transversale <math>\epsilon_{xx}</math>.....</b>                                    | <b>74</b> |
| <b>Figure V.32 : Vecteurs de déplacement longitudinal au cours de l'essai.....</b>                                       | <b>74</b> |
| <b>Figure V.33 : Cartographies déplacements V.....</b>                                                                   | <b>76</b> |
| <b>Figure V.34 : Cartographies déplacements U.....</b>                                                                   | <b>76</b> |
| <b>Figure V.35 : Cartographies de déformation longitudinale.....</b>                                                     | <b>76</b> |
| <b>Figure V.36 : Courbes de déformation longitudinale.....</b>                                                           | <b>77</b> |

# Liste des tableaux

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau I.1 :</b> Les pipelines en acier de grade API.....                                               | 16 |
| <b>Tableau II.1 :</b> Rendement thermique de différents procédés de soudage.....                            | 23 |
| <b>Tableau II.2 :</b> Origines et moyens de prévention liés à la fissuration.....                           | 28 |
| <b>Tableau II.3 :</b> Exemples d'électrodes de soudage TIG conformes ISO 68 48.....                         | 32 |
| <b>Tableau III.1 :</b> Les classes des matériaux.....                                                       | 43 |
| <b>Tableau IV.1:</b> Différents étapes du polissage.....                                                    | 46 |
| <b>Tableau V.1:</b> Composition chimique du Métal utilisé (API 5L X70).....                                 | 57 |
| <b>Tableau V.2 :</b> Les valeurs moyennes de dureté (Hv).....                                               | 60 |
| <b>Tableau V.3 :</b> Propriétés de traction à partir des mesures de dureté.....                             | 61 |
| <b>Tableau V.4 :</b> Propriétés de traction de la zone fondue <b>ZF</b> à partir des mesures de dureté..... | 62 |
| <b>Tableau V.5 :</b> Résultats données par la machine de traction (rationnelle).....                        | 63 |
| <b>Tableau V.6 :</b> Résultats données par la machine de traction <b>ZF</b> (rationnelle).....              | 65 |
| <b>Tableau V.7 :</b> Résultats données par la machine de traction <b>ZAT</b> .....                          | 67 |

## Liste des symboles et des abréviations :

|            |                                                         |
|------------|---------------------------------------------------------|
| API        | : American Petroleum Institute                          |
| HSLA       | : Hight Strength Low Alloy                              |
| HLE        | : Haute Limite d'élasticité                             |
| X70        | : Matériau à haute limite élastique de 70 Ksi (483 MPa) |
| SENT       | : Single Edge Notch Tension                             |
| TIG        | : Tungesten Inert Gas                                   |
| GTAW       | : Gas Tungesten Arc Welding                             |
| MIG        | : Metal Inert Gas                                       |
| MAG        | : Metal Active Gas                                      |
| SAW        | : Submerged Arc Welding                                 |
| MB         | : Métal de Base                                         |
| ZF         | : Zone Fondue                                           |
| ZAT        | : Zone Affectée Thermiquement                           |
| Re         | : Limite élastique                                      |
| Rm         | : Résistance limite à la traction                       |
| Ar         | : L'allongement à la rupture                            |
| E          | : Modul de Young                                        |
| F          | : Force                                                 |
| $\sigma$   | : Contrainte                                            |
| $\epsilon$ | : Déformation                                           |
| Hv         | : Dureté Vickers                                        |
| L          | : Longueur                                              |
| S          | : Surface                                               |
| d          | : Diamètre                                              |

## Introduction générale :

Le soudage occupe une place importante dans le domaine pétrolier et plus particulièrement dans la réalisation des canalisations de transport des hydrocarbures. Les matériaux utilisés pour la fabrication des tubes sont des aciers à haute limite élastique. Jusqu'à présent, de grands efforts se sont concentrés sur le développement de nouvelles nuances de matériaux sous l'influence des contraintes techniques et économiques, et les exigences de plus en plus accrues des conditions de service. Les aciers à haute limite élastique (HSLA) de canalisation avec une microstructure ferrito - perlitique ont été développés depuis les années 70 pour satisfaire les demandes dans les domaines du transport de pétrole brut ou de gaz naturel.

La particularité de ces aciers provient du fait qu'ils offrent une excellente combinaison de haute résistance, de dureté, résistance à la corrosion et de bonne soudabilité. Le transport du gaz dans des conditions économiques nécessite l'utilisation de pressions de transport de plus en plus élevées, et donc l'utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité. De plus, la sécurité des installations demande une bonne ténacité pour éviter la ruine de la structure par propagation rapide des fissures. Les soudures de ces aciers offrent aussi une combinaison de haute résistance et dureté, mais il se peut que ces soudures contiennent des défauts de soudage tels que (fissures, inclusions, soufflures, ...).

Notre étude a pour but l'étude et la caractérisation des joints de soudure qui constituent les maillons faibles des canalisations (dans notre cas en acier API 5L X70) et de ce fait exigent une attention particulière. Les méthodes utilisées pour cette caractérisation sont : - des méthodes classiques qui concernent la métallographie et les essais mécaniques - une deuxième méthode qui est récente qui consiste en la mesure des champs de déplacements et de déformations par corrélation d'image. En outre, la résistance à la propagation de fissure est examinée.

La première partie de ce mémoire est consacrée à l'étude bibliographique, qui s'étale sur trois chapitres.

- Le premier chapitre présente l'évolution des techniques de construction des pipelines et les différentes nuances d'aciers élaborés pour satisfaire aux exigences qu'ils imposent. Une synthèse sur les caractéristiques et les propriétés des aciers HSLA, de leurs résistances à la corrosion et à l'usure y est aussi présentée.
- Le deuxième chapitre présente les différentes techniques de soudage utilisées lors de la construction des pipelines.

- Le troisième chapitre examine le comportement mécanique du matériau utilisé X70 et du cordon de soudure lors des essais mécaniques.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale qui se décompose en deux chapitres (IV et V).

- Le quatrième chapitre présente les différentes techniques expérimentales utilisées pour l'identification métallographique du métal de base et du cordon de soudure et la caractérisation mécanique par essais de traction et par la technique de la corrélation d'image. Ces expériences ont été réalisées au niveau des laboratoires du Centre de recherche en technologies industrielles (CRTI)
- Dans le chapitre cinq (V), nous présenterons les résultats obtenus et les discussions sur les caractéristiques métallographiques et mécaniques de traction de l'acier étudié d'un pipe API 5L X70 et son comportement à la propagation de fissure dans le joint soudé par l'extraction des différents champs de déplacements et de déformations à l'aide de la méthode de la corrélation d'images.

Le mémoire est synthétisé par une conclusion générale qui sera suivie par l'exposé des perspectives qui s'ouvrent à l'issue de ce travail.

## Introduction générale :

Les aciers à haute limite élastique tiennent une place importante dans les industries gazières et pétrolières, et même l'industrie automobile. Jusqu'à présent, la majorité de grands efforts se sont concentrés sur le développement de nouvelles nuances de matériaux sous l'influence des contraintes techniques et économiques, et les exigences de plus en plus accrues des conditions de service. Les aciers à haute limite élastique (HSLA) de canalisation avec une microstructure ferrito - perlitique ont été développés depuis les années 70 pour satisfaire les demandes dans les domaines du transport de pétrole brut ou de gaz naturel.

La particularité de ces aciers provient du fait qu'ils offrent une excellente combinaison de haute résistance, de dureté, résistance à la corrosion et de bonne soudabilité. Le transport du gaz dans des conditions économiques nécessite l'utilisation de pressions de transport élevées, et donc l'utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité. De plus, la sécurité des installations demande une bonne ténacité pour éviter la ruine de la structure par propagation rapide des fissures. Les soudures de ces aciers offrent aussi une combinaison de haute résistance et dureté, mais il se peut que ces soudures contiennent des défauts de soudage tels que (fissures, inclusions, soufflures, ...).

Dans ce manuscrit nous allons étudier les propriétés du matériau API 5L X70 (70Ksi) et son soudage, nous allons traiter également la propagation d'une entaille en forme de fissure située au niveau de la zone affectée thermiquement du côté de la racine. Les méthodes utilisées pour cette caractérisation sont des méthodes classiques qui concernent la métallographie et les essais mécaniques, une deuxième méthode qui est récente est introduite dans ce travail, elle consiste en la mesure des champs de déplacement et de déformation par corrélation d'image numérique.

La première partie du manuscrit est consacrée pour l'étude bibliographique, qui englobe trois (03) chapitres.

- Le premier chapitre présente l'évolution de fabrication des pipelines et les différentes nuances d'aciers élaborés pour satisfaire aux exigences techniques, et une synthèse sur les caractéristiques et les propriétés des aciers HSLA, sa résistance à la corrosion et à l'usure.
- Le deuxième chapitre présente les différentes techniques de soudage utilisées lors de la fabrication des pipelines.

- Le troisième chapitre présente le comportement mécanique du matériau utilisé X70 et du cordon de soudure lors des essais mécaniques.

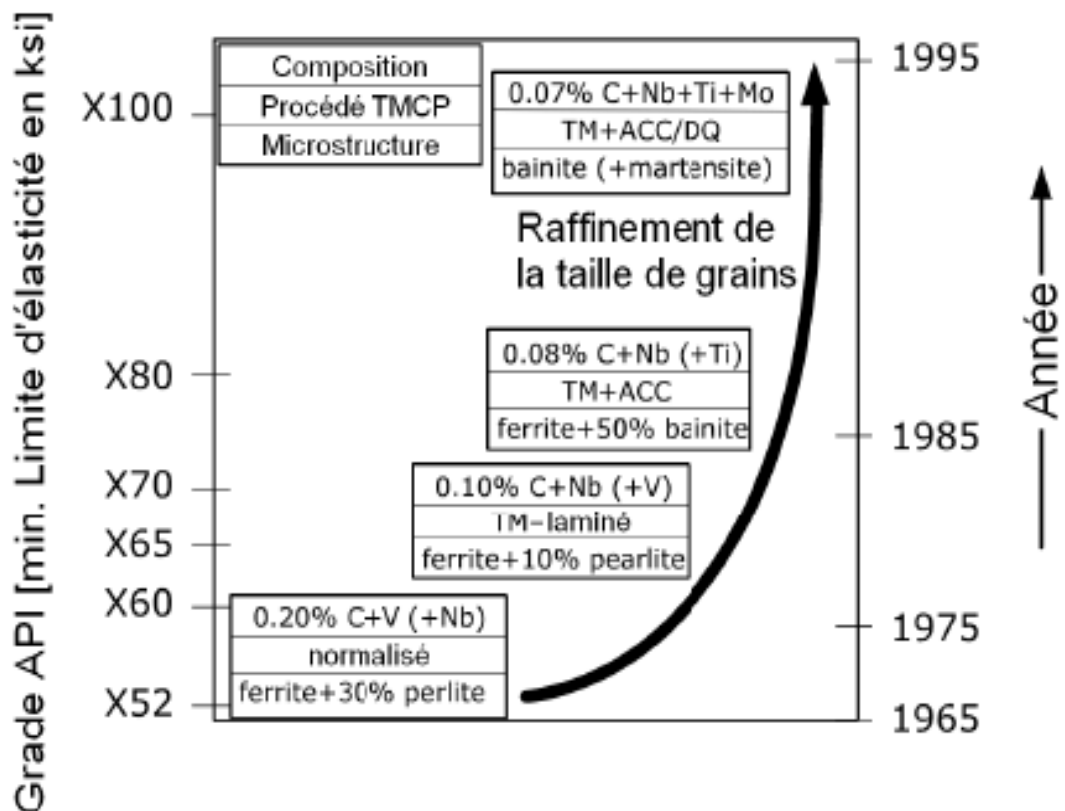
La deuxième partie est consacrée pour l'étude expérimentale qui se décompose en deux chapitres (IV et V).

- Le quatrième chapitre présente les différentes techniques expérimentales utilisées pour l'identification métallographique du métal de base et du cordon de soudure et la caractérisation mécanique des essais de traction avec la technique de la corrélation d'image. Ces expériences ont été réalisées au niveau des laboratoires du Centre de recherche en technologies industrielles (CRTI)
- Dans le chapitre cinq (V), nous présenterons les résultats obtenus et les discussions sur les caractéristiques métallographiques et mécaniques de traction de l'acier étudié d'un pipe API 5L X70 et son comportement à la propagation de fissure dans le joint soudé par l'extraction des différents champs de déplacement et de déformation à l'aide de la méthode de la corrélation d'images.

Le mémoire est synthétisé par une conclusion générale qui sera suivie par l'exposé des perspectives qui s'ouvrent à l'issue de ce travail.

## I.1. Introduction

Dans les années 70, le laminage thermomécanique remplace le laminage à la suite d'une normalisation. Le laminage thermomécanique permet de produire des matériaux équivalents à des X70, à partir d'aciers à faible teneur en carbone et micro-alliés au niobium et vanadium. Un procédé amélioré émerge dans les années 80, il s'agit de la combinaison d'un laminage thermomécanique avec un refroidissement accéléré. Par cette méthode, il est devenu possible de produire des matériaux à plus haute limite d'élasticité, tels que le X80, qui contiennent encore moins de carbone et de ce fait possèdent une excellente soudabilité. Dans les années 90, le laminage thermomécanique est suivi d'un refroidissement accéléré et d'une trempe. Ce dernier procédé, laminage thermomécanique combiné à un refroidissement accéléré, en plus des additions de molybdène, de cuivre et de nickel permet d'augmenter le niveau de résistance jusqu'au grade X100. La figure I.1 présente le développement des aciers à haute limite d'élasticité [1].



**Figure I.1 :** Développement des pipelines (composition, procédé TMCP, microstructure, API grade) [1]

Un pipeline est une canalisation constituée par un ensemble de tubes en acier soudés bout à bout, destinés à l'acheminement d'un endroit à un autre de matières gazeuses ou liquides. Ces tubes sont souvent revêtus extérieurement et voir même intérieurement, et presque toujours enterrés sauf dans certaines régions.



**Figure I.2 :** Pipelines

Un pipeline permet l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Sa longueur peut varier de quelques kilomètres à des centaines de kilomètres, voire des milliers de kilomètres. Très souvent les pipelines sont interconnectés entre eux pour former un réseau parfois très dense.

Ces réseaux mettent en communication différents points d'entrée des produits avec différents points de sortie, permettent de diversifier les sources d'approvisionnement aux meilleures conditions économiques possibles et avec un maximum de sécurité de la livraison en temps voulu [Figure I.3].



**Figure I.3 :** Réseau de transport par canalisation [2]

Selon le produit transporté, les pipelines sont nommés différemment. Leurs techniques de construction et d'exploitation diffèrent en fonction de certaines réglementations.

Les principaux systèmes de transport par pipeline concernent :

- Les gazoducs pour le transport du gaz naturel.
- Les oléoducs pour le transport du pétrole et des hydrocarbures liquides.
- Les aquaducs, conduites ou émissaires utilisés pour l'eau douce et l'irrigation.

## **I.2. Historique et technologie des pipelines**

C'est aux États-Unis en 1865 que fût utilisée, pour la première fois, une conduite pour évacuer la production d'un gisement. Depuis, l'emploi de ce mode de transport des hydrocarbures liquides ou gazeux s'est généralisé, d'abord aux États-Unis, puis dans le reste du monde [3]. En 1964-65, étaient inaugurées les premières installations de transport de gaz naturel liquéfié entre l'usine de liquéfaction d'Arzew (Algérie) et les terminaux méthaniers de Canvey Island (Royaume-Uni) et du Havre (France) [4].

En 1993, les principaux pays exportateurs étaient l'ex-URSS (29% du commerce International), le Canada (18%), les Pays-Bas (13%), l'Algérie (10%), l'Indonésie (9%) et la Norvège (7%). Les principaux pays importateurs étaient l'Allemagne (19%), les États-Unis (18%), le Japon (15%), l'Italie (10%), la France (9%), la Tchécoslovaquie (4%) et la Belgique (4%) [4].

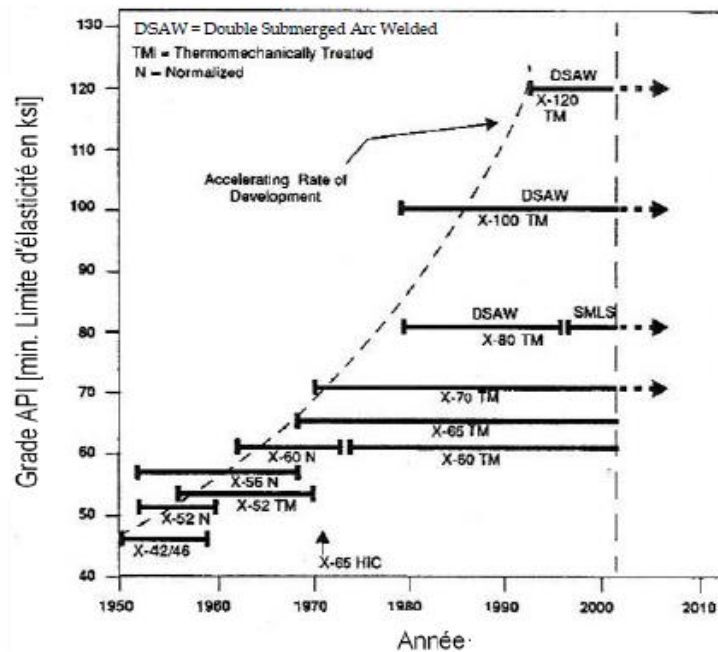
A partir des sites de traitement des gisements ou des stockages, le gaz est transporté à haute pression, (de 16 jusqu'à plus de 100 bars), dans des réseaux de grand transport dont les gazoducs constituent les principaux maillons.

En Afrique, l'Algérie possède un important réseau de gazoducs destiné principalement à évacuer le gaz du gisement de Hassi R'Mel vers les usines de liquéfaction situées sur les côtes méditerranéennes ainsi que vers l'Italie via la Tunisie (système TransMed).

Des progrès technologiques énormes ont été réalisés dans tous ces domaines, surtout depuis 1950. Les coûts de transport ont été réduits partout mais certaines méthodes restent toujours beaucoup plus chères que d'autres.

La technologie des tuyauteries a été révolutionnée, surtout par les progrès de la soudure. Ils sont acheminés sur place et mis dans des tranchées ou sur des supports par des grues spéciales. Des systèmes permettent d'emboîter les tuyaux avec précision. Les tubes soudés peuvent suivre le relief du terrain sans qu'il y est de fuites malgré que les pressions internes peuvent dépassent les 10 bars.

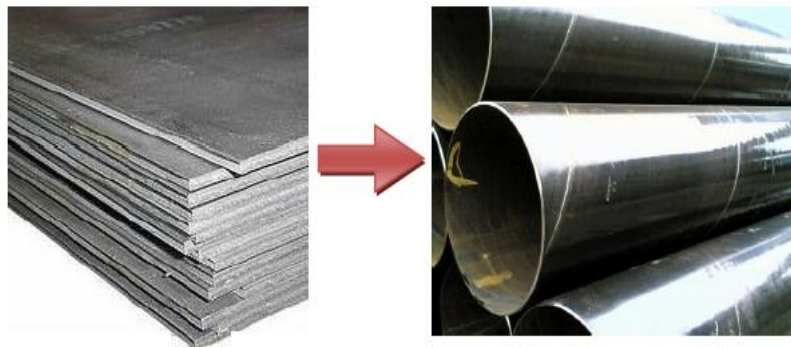
Les points de pressions causées par des coups de bélier ou autres peuvent être importants. La structure, les parois et les soudures doivent résister à des pressions très élevées, de l'ordre de 100 bars. Des stations de pompage sont installées tous les 40 km. Elles comprennent des pompes centrifuges de grande puissance, des valves commandées à distance et des réservoirs préfabriqués. L'entretien est réduit. Des sections de pipelines peuvent être isolées pour vérification, nettoyage ou réparation. Des chariots robots circulent dans les pipelines pour les inspecter ou les nettoyer.



**Figure 1.4 :** Développement des pipelines en acier à haute résistance dans le temps, grade et mise en forme [4].

### I.3. Construction des pipelines :

La fabrication des tubes pour pipelines est la transformation des plaques d'acier en tubes en vue de leur utilisation qui peut changer d'un produit à un autre et d'une région à une autre.



**Figure I.5 :** De la plaque au tube.

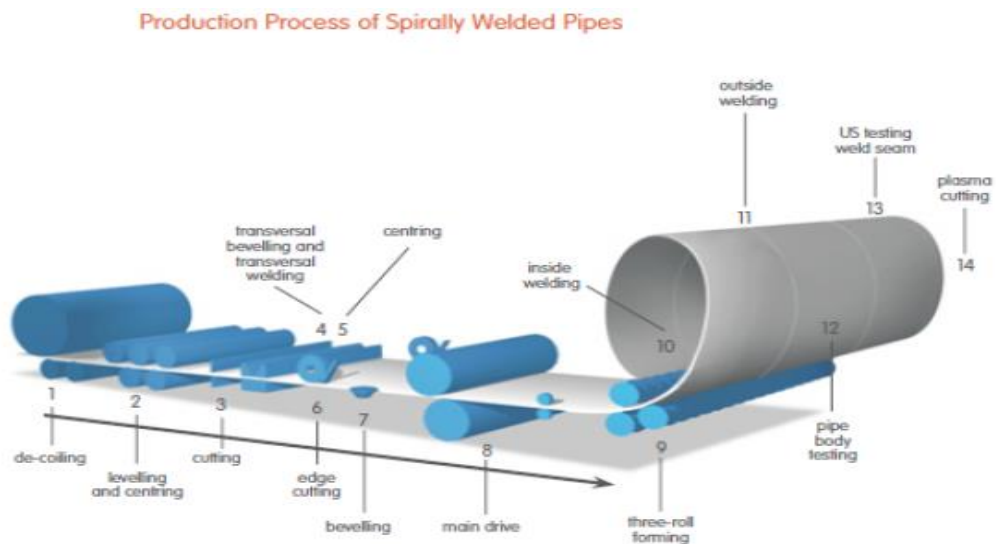
La diversité des diamètres et des épaisseurs de tubes ainsi que le développement avec le temps de leurs techniques de fabrication, constituent les raisons de la diversité du réseau de transport gazier. On retrouve :

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

### I.3.1. Les tubes soudés sous forme spirale

La fabrication de ces tubes est réalisée en continu sur des machines à souder. Après déroulement de la bobine en bande, la tôle est posée dans la cage de formage où elle subit une déformation de cintrage sous l'action d'un vérin. L'obtention du formage en spirale est réalisée par une inclinaison entre l'axe initial de la bande et l'axe de sortie du tube (Figure I.6)

L'enroulement des tubes en spirale permet d'obtenir des tubes calibrés sans avoir besoin de recourir à des étapes de fabrication supplémentaires telles que l'expansion ou le calibrage. De ce fait, le tube précontraint lors de la phase de pliage le reste par la suite. Pour des épaisseurs de paroi au-dessus de 20 mm, on utilise habituellement des tôles fortes. Ce procédé permet une exploitation économique optimale de la largeur de bande disponible, de par le rapport largeur de bande-diamètre allant jusqu'à environ 2,2.



**Figure I.6 :** Procédé de production des tubes soudés en spirale.

### I.3.2. Les tubes soudés sous forme longitudinale :

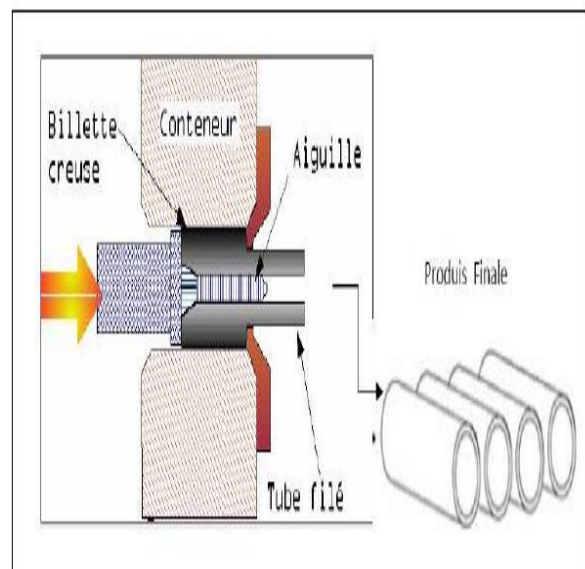
Ils sont obtenus par le procédé U-O-E qui permet de mettre en forme la plaque en tube (voir figure ci-dessous). La tôle est cisailée à la largeur et chanfreinée. Les rives sont "croquées" au rayon du tube. La tôle est ensuite formée en "U" et "O" dans des presses extrêmement puissantes. Deux cordons de soudures ferment l'ébauche avec un procédé à arc multitorches. Chaque tube subit une expansion "E" qui augmente son diamètre de 0,8% à 1,5% et donne un tube parfaitement calibré. L'expansion qui sollicite le métal au-delà de sa limite d'élasticité, est par ailleurs, un test de qualité très sévère pour le tube. La gamme des diamètres fabriqués s'étend de 508 mm à 1420 mm et les tubes sont généralement livrés en longueur de 12 m.



**Figure I.7 :** Photos de la mise en forme des tubes par le procédé « UOE »

### I.3.3. Les tubes réalisés sans soudure

Les tubes formés sans soudure, sont généralement de petits diamètres et de longueur de moins de 450 m, les méthodes principales de fabrication de ce type de tube se font de la façon suivante ; le métal est contenu entre la filière et l'aiguille, et par des pressions de poussées axiales, on obtient un tube monobloc sans soudure. Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe.



**Figure I.8 :** Obtention des tubes sans soudure

## **I.4. Les aciers à haute limite élastique :**

### **I.4.1. Définition des aciers HLE :**

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique (HSLA) sont un groupe d'aciers à faible teneur en carbone qui utilisent un peu d'éléments d'alliage pour atteindre les limites d'élasticité plus supérieures à 275 MPa en état laminé ou normalisé. Ces aciers ont des meilleures propriétés mécaniques et améliorent parfois la résistance à la corrosion que les aciers au carbone laminés. D'ailleurs, parce que la haute limite élastique des aciers HSLA peut être obtenue à basse teneur en carbone, la soudabilité des aciers HSLA est comparable ou meilleur à celui des aciers doux [6].

### **I.4.2. Les aciers HSLA catégories et caractéristiques**

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique incluent beaucoup de catégories standards et de propriétés industrielles conçues pour fournir des combinaisons spécifiques désirées des propriétés telles que la limite d'élasticité, la dureté, la formabilité, la soudabilité et la résistance à la corrosion atmosphérique. Ces aciers ne sont pas considérés comme des aciers alliés, quoique leurs propriétés désirées soient réalisées par l'utilisation de petites additions d'éléments d'alliage.

Les aciers HSLA sont classifiés comme une catégorie d'acier séparée, qui est semblable à l'acier doux laminé avec des propriétés mécaniques augmentées obtenues par (la petite) addition judicieuse des éléments de microalliage et, peut-être, des techniques de traitement spéciales.

Les aciers HSLA peuvent être divisés en six catégories [6]:

#### **I.4.2.1. Les aciers HSLA résistants à la corrosion atmosphérique**

Les premiers aciers HSLA développés étaient les aciers résistants à la corrosion. Ces aciers contiennent de cuivre et d'autres éléments qui augmentent la résistance à la corrosion, le durcissement de la solution-solide, et un certain affinement de grain de la microstructure de ferrite.

Le vanadium et/ou le niobium peuvent améliorer la limite d'élasticité de ces aciers; l'addition du niobium également améliore la dureté. Une normalisation ou un laminage et refroidissement commandés peuvent également affiner la taille de grain (et améliorer

ainsi la dureté et la limite d'élasticité). Cependant, si la normalisation ou le refroidissement accéléré sont employés pour affiner la taille de grain, l'effet du carbone et des éléments de microalliage contenus sur la trempabilité et le potentiel pour des transformations indésirables à la bainite supérieure et à la ferrite de Widmanstätten doivent être considérées.

#### I.4.2.2. Les aciers microalliés ferrito-perlitique

Ces aciers emploient des additions des éléments de microalliage tels que le niobium et le vanadium pour augmenter la limite d'élasticité d'acier laminé à chaud sans teneur élevée de carbone et/ou de manganèse améliorer la soudabilité et la dureté. Les propriétés des matériaux structuraux ont résulté de la découverte qu'une très petite quantité de niobium et de vanadium ( $< 0.10\%$ ) renforcent les aciers de carbone-manganèse sans interférer le traitement suivant. La teneur de carbone a pu être réduite ainsi pour améliorer la soudabilité et la dureté parce que les effets de durcissement du niobium et du vanadium ont compensé la réduction de la dureté en raison de la réduction du taux de carbone.

Le développement des procédés de laminage couplés à la composition chimique a produit la limite d'élasticité élevée accompagnés d'un abaissement progressif du taux de carbone. Beaucoup de la classe des aciers HSLA microalliés ont le contenu de carbone bas que  $0.06\%$  ou même s'abaisse, pourtant peut encore développer des limites d'élasticité de 485 MPa. La haute limite élastique est réalisée par les effets combinés de la taille de grain fin développé pendant le laminage à chaud et de la précipitation durcissant cela est dû à la présence du vanadium, du niobium, et du titane.

Les divers types des **aciers microalliés ferrito-perlite** incluent :

- Les Aciers microalliés au vanadium.
- Les Aciers microalliés au niobium.
- Les Aciers microalliés au niobium-molybdène.
- Les Aciers microalliés au niobium-vanadium.
- Les Aciers microalliés au vanadium-azote.
- Les Aciers microalliés au titane.
- Les Aciers microalliés au niobium-titane.

- Les Aciers microalliés au vanadium-titane.

Ces aciers peuvent également inclure d'autres éléments pour la résistance à la corrosion et le durcissement de la solution solide, ou augmenter la trempabilité (si des produits de transformation autres que la ferrite-perlite sont désirés).

#### **I.4.2.3. Les aciers perlitiques laminés de construction**

Les aciers perlitiques de construction laminés sont un groupe spécifique d'aciers HSLA ayant des propriétés mécaniques augmentées sont obtenus par l'addition des quantités modérées d'un ou plusieurs éléments de microalliage autres que le carbone (et, dans certains cas, la résistance à la corrosion atmosphérique) sont obtenus par l'addition des quantités modérées d'un ou plusieurs éléments de microalliage autres que le carbone. Certains de ces aciers sont des aciers de carbone-manganèse et diffèrent des aciers au carbone ordinaires seulement en ayant un plus grand contenu de manganèse. D'autres aciers de construction perlitiques contiennent un peu d'éléments d'alliage, qui sont ajoutés pour augmenter la soudabilité, la formabilité, la dureté, et la résilience.

Les aciers perlitiques de construction laminés sont caractérisés par des limites d'élasticités dans la gamme de 290 à 345 MPa. Ils ne sont pas prévus pour la trempe et ne devraient pas être soumis à un tel traitement. Pour certaines applications, ils peuvent être recuits, normalisés, ou soumis à un effort relaxé, processus qui peuvent changer les propriétés mécaniques.

Quand ces aciers sont employés en structures soudées, le soin doit être pris dans le choix de catégorie et dans les spécifications des détails de procédure de soudage. Certaines catégories peuvent être soudées sans préchauffage ou post-chauffage. Les inconvénients de base de ces aciers est que la microstructure perlitique augmente la température de transition mais n'améliore pas la limite d'élasticité.

#### **I.4.2.4. Les aciers de ferrite aciculaire**

Une autre approche au développement des aciers HSLA est d'obtenir une microstructure de ferrite aciculaire très fine et de haute résistance, au lieu de la microstructure polygonale habituelle de ferrite, pendant la transformation de refroidissement des aciers à ultra bas carbone ( $< 0.08\% \text{ C}$ ) avec la trempabilité

suffisante (par des additions de manganèse, de molybdène, et/ou de bore). Le niobium peut également être employé pour le durcissement par précipitation et l'affinement de grain. La différence principale entre la structure de la ferrite aciculaire (désignée également sous le nom de la bainite à faible teneur en carbone) et celle de la ferrite polygonale est que l'ancien est caractérisé par une densité de dislocation élevée, et les grains fins fortement ovales qui ne sont pas exhibés en ferrite polygonale.

Les aciers de ferrite aciculaire peuvent être obtenus par trempage ou, de préférence, par le refroidissement à l'air avec les alliages appropriés pour la trempabilité. L'avantage principal de ce type d'acier HSLA est la combinaison peu commune de haute limite d'élasticité (415 à 690 MPa), de la résilience élevée, et de la bonne soudabilité. Une application importante de ces aciers est le pipeline.

L'application principale de l'acier de ferrite aciculaire implique les canalisations d'hydrocarbures dans des conditions arctiques. Cette application exige une combinaison de dureté supérieure, de haute résistance, d'excellente résistance à la fissuration induite par l'hydrogène et la soudabilité de premier ordre de champ.

En réponse à ces besoins, les chercheurs ont développé un acier de ferrite aciculaire dur pour le pipeline par l'optimisation du contenu de carbone et de niobium, l'addition du bore, et/ou l'application du refroidissement en ligne accélérée.

Dans ce pipeline, le contenu optimum de carbone s'étend de 0.01 à 0.05%. En dessous de 0.01% de carbone, les grains de la zone affectée thermiquement (ZAT) proches de la zone fondue sont fragilisés, à cause de la fissuration intergranulaire induit par l'hydrogène et de la perte de dureté dans la ZAT. L'addition du bore et/ou de l'application du refroidissement en ligne accélérée assure une dureté supérieure et une haute résistance, avec des caractéristiques de soudage souhaitables.

Trois catégories pour le service arctique sont disponibles : X-65, X-70, et X-80. Une composition X-70 inclut 0.03% C, 0.25% silicium, 1.91% manganèse, 0.008% P, 0.001% S, 0.048% N, plus le titane, le bore, et le calcium.

#### **I.4.2.5. Les aciers à double phase (dual phase)**

Ces aciers ont une microstructure de ferrite polygonale (de 80 à 90%) et des îles de martensite de 10 à 20% dispersées dans toute la matrice de ferrite. Le terme de dual phase se rapporte à la prédominance dans la microstructure de deux phases, la ferrite et la martensite. Ces aciers ont une basse limite d'élasticité et une résistance à la traction approximativement de 550 MPa. Les aciers Dual-phase peuvent être produits à partir des aciers à faible teneur en carbone.

#### **I.4.2.6. Les aciers à forme d'inclusion contrôlée**

Un développement important dans les aciers HSLA microalliés est l'utilisation du contrôle de la forme d'inclusion. Les inclusions de sulfure, qui sont plastique aux températures de laminage et ainsi s'allongent et aplatissent pendant le laminage, affectent défavorablement la ductilité dans (par l'épaisseur) la direction transversale courte. L'objectif principal du contrôle de la forme d'inclusion est de produire des inclusions de sulfure avec la plasticité négligeable même aux températures de laminage les plus élevées.

### **I.4.3. Propriétés des aciers HSLA**

#### **I.4.3.1. Éléments de micro-alliage**

La teneur limite qui distingue les aciers micro-alliés des aciers faiblement alliés se situe aux environs de 0,1 % C [7].

Dans le cas des aciers faiblement alliés, pour une teneur inférieure à 0,1 % C les effets des éléments métalliques en solution solide homogène sont considérés comme très faibles. Dans le cas du micro-alliage, la formation de composés très fins et très nombreux modifie considérablement les microstructures et les propriétés.

Les éléments principaux de micro-alliage sont :

- le titane ;
- le niobium ;
- le vanadium.

Le mode d'action des trois éléments retenus passe par les phénomènes de précipitation, mais avec des interactions avec les phénomènes métallurgiques de transformation de

phase, de recristallisation après écrouissage à chaud ou à froid et de blocage des mouvements des joints de grain ou des dislocations [7].

#### **I.4.3.2. Composés : carbures, nitrures, oxydes**

Les composés formés par les éléments de microalliage sont de plusieurs types :

- Des précipités qui se forment en phase solide ;
- Des composés qui se forment au moment de la solidification ;

Il est donc nécessaire de distinguer deux classes :

- Les précipités proprement dits qui peuvent être redissouts en phase solide à haute température : carbures, carbonitrures, certains nitrures ;
- Les précipités pratiquement insolubles: oxydes, oxysulfures, oxycarbosulfures, TiN, etc.

Le microalliage le plus important actuellement est celui des aciers avec précipités formés à l'état solide qui sont des carbures, des nitrures ou des carbonitrures qui peuvent être dissous par réchauffage.

#### **I.4.3.3. Propriétés propres à chaque élément**

##### **❖ Titane**

Élément d'addition bien connu pour désoxyder, dénitrurer ou fixer l'azote, le titane était réputé délicat à utiliser en raison de la formation de précipités grossiers, cubiques, très durs (surtout de nitrures mais aussi des oxycarbosulfures) et très néfastes pour la ductilité, la ténacité, la tenue en fatigue et l'usinabilité.

Les progrès de la métallurgie secondaire et l'emploi du vide ont permis de s'affranchir de ces inclusions et l'on peut ainsi utiliser le titane en microalliage avec des précipitations fines. Comme indiqué dans les conditions générales, la présence de titane en solution puis la précipitation ont pour conséquence de retarder la recristallisation, de durcir la matrice en fixant l'azote et le carbone [7].

##### **❖ Niobium**

Ce sont sans doute les précipités les plus fins qui sont obtenus d'où un durcissement global très intéressant ; le niobium est également très efficace pour le contrôle des grains en TTM (traitement thermomécanique) [7].

##### **❖ Vanadium**

Le vanadium facilement redissout peut se révéler plus souple d'emploi que le niobium ou le titane quand les cycles thermiques sont plafonnés en température spécialement en traitement thermique ou en formage à partir de basses températures ; mais en contrepartie,

il ne permet pas de contrôler le grain par les effets de recristallisation ou de blocage des joints.

Il faut également tenir compte d'une interaction vanadium aluminium en ce qui concerne la formation de nitrures ; la disponibilité de l'azote pour la formation de VN dépend des conditions de précipitation du nitrure d'aluminium qui peut se substituer à VN suivant les conditions d'équilibre et de cinétique ; si l'azote est sous la forme de NAl, le durcissement sera dû au carbure VC seul [7].

#### **I.4.3.4. L'effet des éléments de micro-alliage sur les propriétés**

L'effet global des éléments de micro-alliage sur les propriétés mécaniques est la somme de l'effet durcissant des précipités et des modifications de structure par suite des changements de la taille des grains ou d'autres sous-structures; il est donc nécessaire, pour chaque propriété, de distinguer l'effet des précipités (durcissement, fragilisation...), l'effet induit sur la microstructure, comme l'affinement de grain, et l'effet indirect par d'éventuels changements de la composition de base de la nuance, comme une baisse de la teneur en carbone [7].

#### **I.4.4. Propriétés mécaniques des aciers HSLA**

Les aciers HSLA possèdent une limite élastique élevée, associée à de bonnes propriétés de résilience. Ces aciers ne présentent pas de transition ductile - fragile au-dessus de 40°C, ce qui rend possible leur utilisation dans les conditions extrêmes de température rencontrées sur terre. Généralement, la limite élastique des aciers peut être accrue en augmentant la teneur en carbone. En effet, le carbone en solution solide et les précipités de carbure (ou carbonitride) limitent le mouvement des dislocations et retardent la déformation plastique.

Le carbone est cependant un élément fragilisant et l'augmentation de la limite élastique se fait au détriment des propriétés de résilience. Un bon compromis entre la résistance et la résilience peut être obtenu en adaptant les compositions chimiques et les conditions d'élaboration. Les aciers HSLA possèdent des taux de carbone relativement bas, de l'ordre 0.05 %. Les éléments d'alliage (N, Mn, V, Ti, Nb, etc.) sont ajoutés en faible proportion, dans deux buts principaux :

1. pour limiter la croissance des grains d'austénite au cours de l'étape d'élaboration à chaud.
2. pour renforcer la ferrite à température ambiante.

**Tableau I.1** : Les pipelines en acier de grade API [8].

| Grade ( $\geq, =$ ) | Limite d'élasticité Re |     | Limite à la rupture Rm |     |
|---------------------|------------------------|-----|------------------------|-----|
|                     | Ksi                    | MPa | Ksi                    | MPa |
| <b>API 5L X42</b>   | 42                     | 290 | 60                     | 414 |
| <b>API 5L X52</b>   | 52                     | 359 | 66                     | 455 |
| <b>API 5L X60</b>   | 60                     | 414 | 75                     | 517 |
| <b>API 5L X65</b>   | 65                     | 448 | 77                     | 531 |
| <b>API 5L X70</b>   | 70                     | 483 | 82                     | 565 |
| <b>API 5L X80</b>   | 80                     | 552 | 90                     | 621 |

#### I.4.5. Comportement plastique des aciers HSLA

D'une manière générale, la présence d'éléments d'alliage à basse température, sous forme de carbonitrides ou sous forme de solutés, contribue à l'augmentation de la limite élastique du produit final. En adaptant les paramètres d'élaboration à haute température, une microstructure favorable peut être obtenue et contribue à la résistance des aciers HSLA. Les mécanismes permettant d'augmenter la résistance des aciers, appelés mécanismes de durcissement, jouent un rôle essentiel dans le comportement mécanique des aciers HSLA et sont décrits ci-dessous.

##### I.4.5.1. Durcissement par solution :

Les éléments d'addition en solution solide dans la ferrite créent des champs de contraintes élastiques en raison de leur différence de taille avec les atomes de fer (dans le cas des solutés substitutionnels) ou avec les sites interstitiels (pour les solutés interstitiels). D'autre part, ils modifient localement les constants élastiques du réseau cristallin par leur effet sur les forces de liaison interatomiques. Lorsqu'une ligne de dislocation passe près d'un soluté, la superposition de son champ élastique propre à celui du soluté conduit à une diminution de l'énergie de l'ensemble. Les solutés ancrent les dislocations et créent une force de freinage à leur déplacement. [9] [10].

#### I.4.5.2. Durcissement par dispersion de précipités

Les particules des phases mineures dispersées dans la ferrite offrent une forte résistance au glissement des dislocations car les systèmes de glissement dans le réseau de la deuxième phase sont différents de ceux de la matrice. Sous l'influence des contraintes appliquées, les dislocations de la matrice peuvent contourner les obstacles en créant une boucle de dislocation au voisinage de la particule. Ce processus consomme de l'énergie mécanique et augmente la contrainte d'écoulement.

Dans certains cas particuliers où il existe une continuité entre le plan de glissement de la ferrite et un plan de glissement dans la particule, la dislocation peut traverser la particule par cisaillement. Pour la majorité des aciers, la taille des précipités ne permet pas l'activation de ce mécanisme. [11]

#### I.4.5.3. Durcissement par joints de grains

Dans le cas de la ferrite polycristalline, la désorientation entre deux grains empêche le passage d'une dislocation d'un grain à un autre. Aux joints de grains, les dislocations en mouvement s'empilent, ce qui crée un champ de contraintes dans le grain voisin. Ce champ de contraintes est d'autant plus élevé que le nombre de dislocations dans l'empilement est grand. Au-delà d'une valeur critique, les contraintes sont suffisantes pour activer une source de dislocations dans le grain voisin et pour propager ainsi la déformation plastique d'un grain à l'autre. La variation de la limite d'élasticité résultant du blocage des dislocations aux joints de grains.

#### I.4.5.4. Durcissement par dislocations

La superposition des champs de contraintes élastiques créés par des dislocations induit des forces d'attraction et de répulsion entre ces dernières, contribuant à l'augmentation de la limite d'élasticité des matériaux [12].

Enfin, un dernier type de renforcement doit être signalé : il s'agit d'un **renforcement lié à la texture du matériau**. L'activation des systèmes de glissement d'un monocristal dépend de son orientation par rapport à la contrainte appliquée. Dans le cas d'un polycristal, la déformation plastique dépend de la statistique d'orientation des grains, c'est à dire de la texture, et de la direction de sollicitation. Ainsi, deux matériaux ne différant que par leur texture peuvent posséder deux limites élastiques différentes.

Ainsi, l'augmentation de limite élastique peut être obtenue en adaptant les paramètres de procédé de manière à :

- (i)- affiner la microstructure ferritique par limitation de la croissance des grains de la phase austénitique,
- (ii)- créer des phases minoritaires (précipités carbonitrurés, éventuellement martensite et austénite résiduelle), en choisissant des paramètres de refroidissement adéquats.

#### **I.4.6. Résistance à l'usure des aciers HSLA**

L'usure est un phénomène complexe progressif destructif au cours duquel la détérioration des surfaces se produit dans le fonctionnement et les composants industriels peuvent rompre en raison d'une lubrification inadéquate, une mauvaise conception, une manipulation excessive ou un mauvais fonctionnement. Elle conduit à de lourdes dépenses pour l'entretien et le remplacement des équipements d'installations industrielles, entraînant un coût de fonctionnement important pour les processus industriels [13]. Compte tenu de ce qui précède, des aciers faiblement alliés à haute résistance faiblement alliés (aciers HSLA qui sont largement utilisés comme des composants structurels fixes et pour les équipements mobiles tels que les automobiles, les engins de terrassement et d'extraction) ont été soumis à une étude, par S. Mohan et al. [14], afin d'évaluer leur résistance à l'usure dans différentes conditions de charges, de distances et de vitesses de glissement à la température ambiante. Une analyse critique des débris et de la topographie de surface a été réalisée pour comprendre le mécanisme d'usure sous ces différentes conditions de fonctionnement.

Les échantillons ont été traités thermiquement pour produire une structure Dual-Phase constituée d'îlots de martensite dure enrobée dans une matrice de ferrite douce. Les résultats ont indiqué que la perte de l'usure par abrasion augmente avec la diminution de la dureté, ainsi que l'augmentation de la taille des grains de la microstructure initiale. La perte d'usure aussi augmente avec la charge appliquée. L'analyse de la phase de débris d'usure a révélé la présence de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  indiquant une tendance à un mécanisme oxydatif. La variation de la perte à l'usure avec une longueur de glissement et de la charge appliquée est en corrélation avec la microstructure du matériau et de la distribution de phases.

Selon Padap et al. [15], un certain nombre d'études ont été réalisées récemment pour optimiser la relation entre les propriétés mécaniques et la microstructure des aciers HSLA

et ont permis de montrer que le coefficient de frottement moyen de ces aciers est compris entre 0,58 et 0,62.

#### **I.4.7. Résistance à la corrosion**

Malgré les mesures de protection cathodique et de revêtement des tubes, ceux-ci sont soumis à la corrosion: attaque externe par les conditions d'environnement (nature des sols, humidité, température...), et attaque interne par le gaz lui-même selon le mécanisme HIC (Hydrogen Induced Corrosion) par  $H_2S$ . La propagation de microfissures de corrosion est de plus activée par les contraintes de traction agissant sur la structure : pression de service, flexions, variation cyclique de pression. On parle alors de corrosion sous contrainte **SCC** (Stress Corrosion Cracking).

L'endommagement par la corrosion externe se traduit par l'apparition progressive de colonies de microfissures. C'est la coalescence et la propagation de ces fissures qui peut constituer une amorce de fuite ou de rupture. L'effet de la corrosion sur l'intégrité du pipeline peut donc se révéler longtemps après l'apparition du phénomène. Ce problème devient de plus en plus important avec le vieillissement des réseaux d'oléoducs et de gazoducs.

Etant donnée la faible teneur en éléments d'alliage, ceux-ci n'exercent pas de protection directe contre la corrosion. En revanche, il est maintenant admis que les impuretés (S, P) ont un effet néfaste sur la corrosion SCC ou HIC. La présence d'inclusions allongées de sulfure de manganèse MnS favorise le phénomène [16]. Les efforts réalisés pour augmenter la résilience en baissant le taux d'impuretés se traduisent également par un effet favorable sur la résistance à la corrosion.

Les aciers pour gaz acides ont des spécifications sur la composition chimique plus strictes que les autres aciers. Ils ont généralement une teneur en carbone très faible ( $\% C < 0.05 \%$ ) et une teneur réduite en manganèse ( $\% Mn < 1.5 \%$ ) [17]. Les spécifications en termes de limite d'élasticité sont moins sévères que pour les aciers à haut grade. Les épaisseurs demandées sont généralement plus importantes.

### II.1. Introduction :

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, on a peu à peu utilisé le terme de soudage, désignant l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation de soudures, plutôt que celui de soudure, désignant alors le joint par lui-même.

Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, on distingue le soudage autogène du brasage, ainsi que le métal de base (matériau constituant les pièces à assembler) du métal d'apport (matériau étranger qui intervient dans l'opération d'assemblage). On distingue ainsi le soudage dont « les pièces à assembler participent à la construction du joint » du brasage dont « la constitution du joint est réalisée par l'intervention du seul métal d'apport ». Trois techniques d'assemblages peuvent être ainsi clairement définies :

**Le soudage :** opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler, généralement de natures très voisines. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé.

**Le brasage :** opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement. Ce dernier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération.

**Le soudobrasage :** technique qui se rapproche du soudage par son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

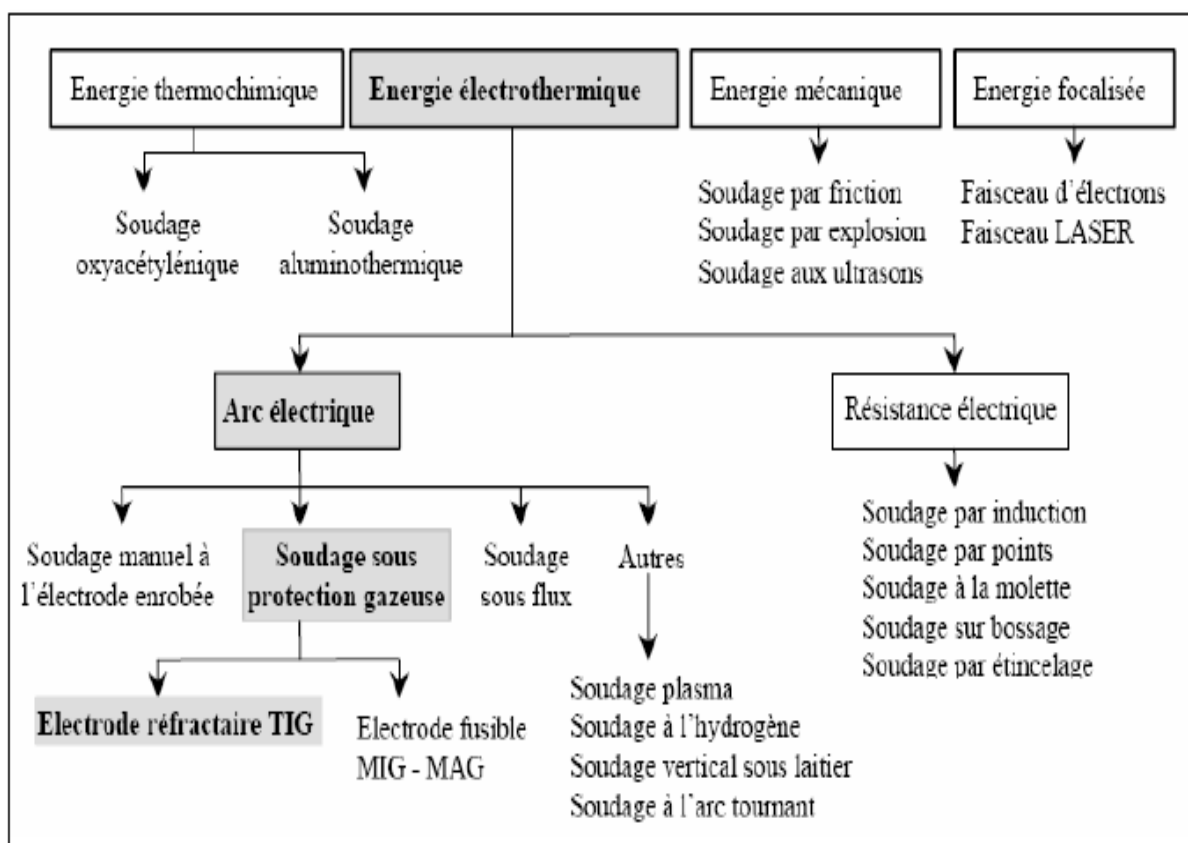
Le brasage et le soudobrasage cherchent à bénéficier des effets de mouillage du métal d'apport sur les pièces. Nous verrons que de tels effets existent en soudage mais sont préjudiciables à la morphologie optimale des joints soudés et ne sont pas systématiquement recherchés.

## II.2. Définition du soudage :

Le soudage est un procédé de fabrication ; il permet de relier deux pièces métalliques en une seule. On peut souder des métaux semblables ou dissemblables, la jonction qui les relie est de nature métallurgique plus que mécanique. Il existe plusieurs modes de soudage : soudage à l'arc, soudage au gaz, brasage...etc.

## II.3. Classification des procédés du soudage :

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres la continuité métallique est obtenue sans fusion par effet purement mécanique. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme représenté sur la figure II.1



**Figure II.1:** Classification des procédés du soudage [18].

#### II.4. Etat de l'art :

Et voilà brièvement la chronologie d'évolution de l'analyse de l'aspect thermique du soudage :

- Au début, l'approximation des solutions a été faite par les solutions analytiques classiques du champ de température transitoire telles que les solutions de Rosenthal [19] concernant les tôles semi-infinies sujettes à des sources de chaleur ponctuelles ou linéaires.

- Après, Pavelic et al [20] ont d'abord suggéré que la source de chaleur devrait être distribuée et ils ont proposé une distribution gaussienne du flux par un modèle de disque circulaire.

- D'autres auteurs ont utilisé des méthodes empiriques [21]. Par ailleurs des modélisations utilisant des distributions de surface et de volume de la source de chaleur avec la fonction de Gauss ont été élaborées et calculées en 2D et 3D par différentes méthodes (numérique et analytique) :

- Eagar et Tsai [22] ont modifié la théorie de Rosenthal pour inclure une source de chaleur gaussienne à distribution surfacique bidimensionnelle (2D), avec un paramètre de distribution constant qui représente le rayon effectif de l'arc.

- Jeong et Cho [23] ont introduit une solution analytique pour le champ de température transitoire dans les soudures avec métal d'apport en se basant sur une source gaussienne 2D avec des paramètres de distribution différents (dans les deux directions x et y).

- Goldak et al. [24] furent les premiers à introduire une modélisation avec une source de chaleur mobile 3D de type double ellipsoïde. Une formulation par les éléments finis a été utilisée pour le calcul du champ de température.

- Cependant il est à souligner qu'une forme modifiée du modèle 3D précédent a été développée récemment, c'est le cas notamment du modèle Fang et al [25]. Ce modèle traite le déplacement avec des déviations cycliques de l'arc (welding with weaving).

## II.5. Comparaison des différents procédés du soudage :

### II.5.1. Comparaison des rendements thermiques :

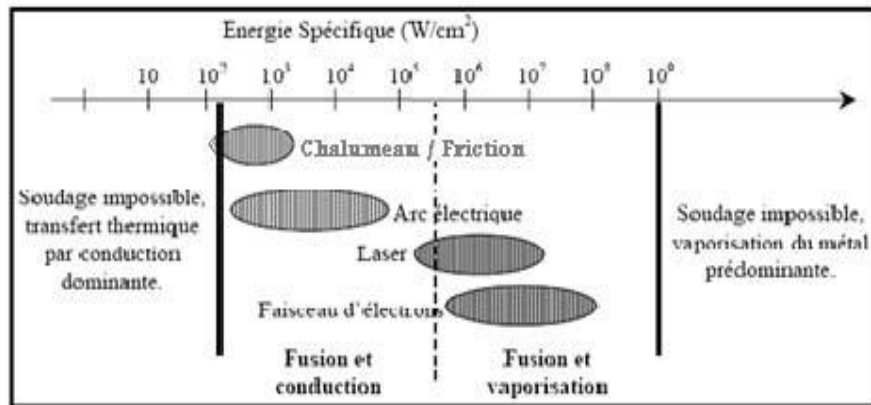
**Tableau II.1** : Rendement thermique de différents procédés de soudage [26].

| Procédé du soudage            | Rykalin (1951) | Christensen (1965) | Tsai (1985) | Dupot (1995) |
|-------------------------------|----------------|--------------------|-------------|--------------|
| Soudage MIG/MAG               | 0.65-0.85      | 0.66-0.70          | 0.70-0.80   | 0.80-0.88    |
| Soudage TIG                   | 0.20-0.75      | 0.22-0.48          | - -         | 0.60-0.72    |
| Soudage à l'arc Submergé SMAW | 0.65-0.85      | 0.66-0.85          | 0.55-0.90   | - -          |

### II.5.2. Comparaison des énergies spécifiques

La conséquence directe de cette classification est la comparaison des différentes sources d'énergies mises en jeu [18]. Pour comparer les différents procédés entre eux, il est préférable d'utiliser la notion d'énergie spécifique (énergie par unité de surface) (Figure II.2). Il ressort que les procédés à arc électrique ont des énergies spécifiques moyennes et celle du soudage par friction est faible.

Les procédés de soudage les plus répandus pour l'assemblage des matériaux utilisés dans l'industrie sont le soudage à l'arc avec électrode à tungstène (TIG), le soudage MIG (Metal Inert Gaz), le soudage Laser et le soudage par Faisceau d'Electrons, mais ces deux derniers nécessitent une grande quantité d'énergie, donc très onéreux et peu utilisés. A ces procédés s'ajoute un récent apparu à la fin du siècle dernier (1991) [27], toujours en développement ; c'est le soudage par friction malaxage FSW. Celui-ci permet de surmonter quelques problèmes rencontrés lors du soudage des alliages d'aluminium par les procédés classiques de fusion.



**Figure II.2 :** Comparaison de l'énergie spécifique des différents procédés [28.18].

## II.6. Différents aspect du soudage :

### II.6.1. Aspect thermique du soudage :

Au cours du soudage à l'arc, l'effet thermique est prépondérant et est caractérisé par :

- Un rapide changement de température (élévation de température et refroidissement) ;
- Un faible temps de maintien de la température maximale ;
- Une localisation de points chauds entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides ;
- Une importante énergie de soudage régissant le cycle thermique et induisant dans la structure une zone fondue et une zone affectée thermiquement.

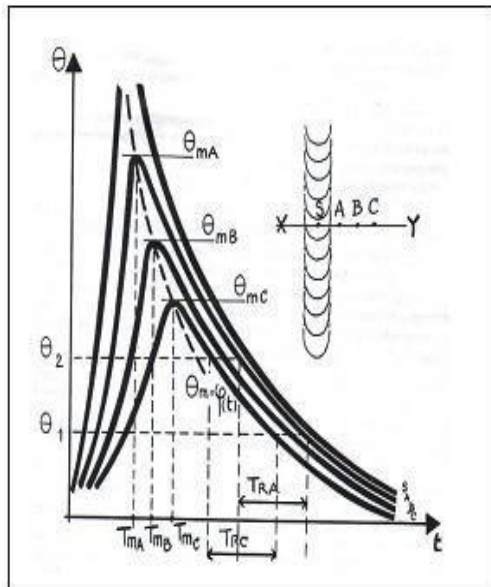
Le cycle thermique résultant du procédé est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon la composition chimique du matériau, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou ductile.

### II.6.2. Cycle thermique du soudage

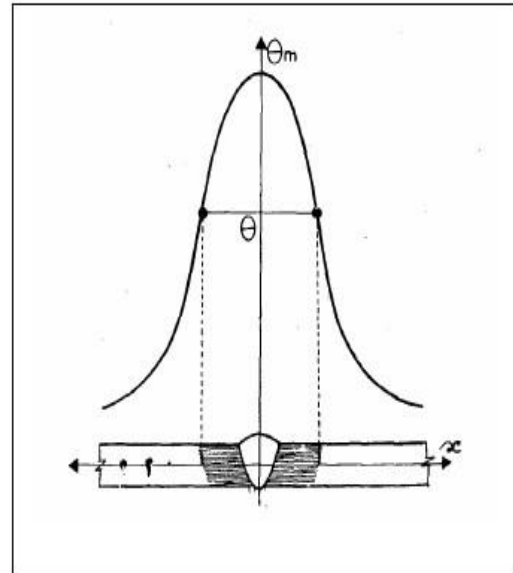
Sur le plan thermique, le soudage est caractérisé par un apport important et localisé de chaleur sur la pièce soudée. La diffusion de l'énergie, ainsi apportée, dans le métal fait du soudage une véritable opération de traitement thermique. Ces effets sont caractérisés par [29]:

- Un chauffage très rapide jusqu'à une température comprise entre la température initiale et la température de fusion du métal.
- Un refroidissement qui succède immédiatement au chauffage et dont la cinétique dépend essentiellement des paramètres de soudage.

L'intérêt de la connaissance du cycle thermique (c'est-à-dire la variation de la température en fonction du temps, en tout point de l'assemblage) de soudage est de permettre l'interprétation quantitative des phénomènes métallurgiques engendrés par cette opération pour déterminer le critère de choix des procédés de soudage et des modes opératoires [30].



**Figure II.3 :**  $\theta = f(t)$ , Faisceau de courbes de cycle thermique [31]



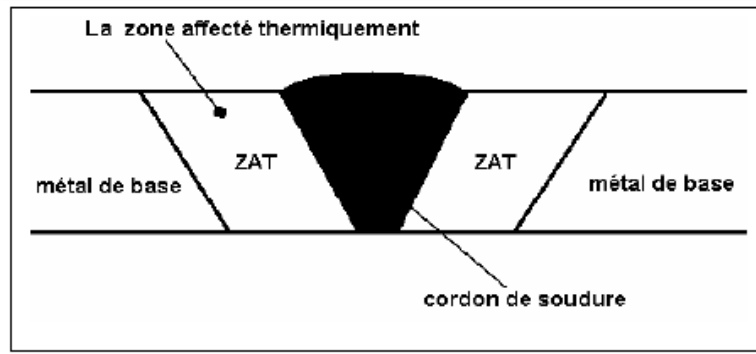
**Figure II.4 :**  $\theta = f(x)$  répartition de température dans la soudure [31]

### II.6.3. Aspect métallurgique du soudage :

Un procédé de soudage peut être assimilé à une opération locale d'élaboration métallurgique et de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique engendré par le soudage. Une fois réalisée, la soudure par fusion se décompose en plusieurs zones.

### II.7. Morphologie d'un cordon de soudure :

Le joint soudé contient différentes zones dont les propriétés mécaniques dépendent de plusieurs facteurs, comme la vitesse de refroidissement, la taille des grains et les contraintes résiduelles. Le joint soudé, comme le montre la Figure II-5, peut se composer de [29] :



**Figure II.5 :** Différentes parties d'un joint soudé [29]

**a) Zone Fondue (ZF) :** zone où l'état liquide est prépondérant où la structure métallurgique obtenue après solidification dépend du cycle de refroidissement. On distingue des gradients de concentration de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner les variations de dureté.

**b) Zone Affectée Thermiquement (ZAT) :** zone adjacente à la zone fondue sur une largeur plus ou moins étendue qui a été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

**c) Zone de Liaison (ZL) :** zone située entre la ZF et la ZAT, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

**d) Métal de Base (MB) :** au-delà de la ZAT, l'élévation de la température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale.

## II.8. Types des soudures :

L'obtention d'une meilleure résistance mécanique pour une meilleure qualité de la soudure exige de faire un choix sur le type de soudure.

Le choix de type de soudure dépend de la procédure employée, des matériaux utilisés et de l'épaisseur de la pièce.

On distingue trois types de soudures :

-**La soudure homogène :** dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature.

- **La soudure hétérogène de type « A » :** qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.

- **La soudure hétérogène de type « B »** : où les métaux de base et le métal d'apport sont tous trois de natures différentes.

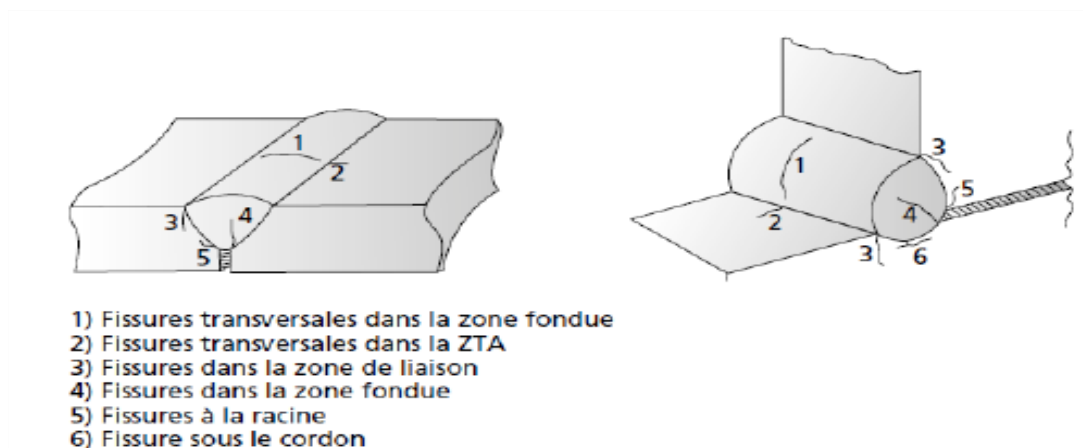
### II.9. Les défauts du soudage :

La qualité du cordon de soudure peut dépendre de plusieurs paramètres, comme l'énergie de soudage, l'électrode utilisée et la vitesse d'avance. Différents défauts sont susceptibles d'apparaître suite à un mauvais réglage du matériel. Ainsi, le chauffage du métal peut engendrer le phénomène de ségrégation pendant lequel les impuretés des éléments d'alliage migrent aux joints de grains, ce qui favorise un mode de rupture fragile inter-granulaire [32].

Les principaux défauts de soudage sont :

- ✓ Les fissures
- ✓ Les cavités
- ✓ Les inclusions solides
- ✓ Le manque de fusion
- ✓ Les défauts de forme

La fissure peut se former lors du refroidissement du cordon ou/et sous l'effet des contraintes à l'état solide et pour des volumes de cordon insuffisants. Elles peuvent notamment apparaître en présence d'hydrogène (électrode non étuvée) dans le métal de base, la ZAT ou la zone de liaison et du métal fondu.



**Figure II.6 :** Fissuration dans les joints soudés [33]

Le tableau II-2 résume les différentes origines et les moyens de prévention de la fissuration à chaud et à froid.

**Tableau II.2 : Origines et moyens de prévention liés à la fissuration**

|                     | origines                                                                                                                                                                                                                                                             | Moyens de préventions                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fissuration à chaud | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Joint trop étroit</li> <li>- Cordon trop petit</li> <li>- Présence d'impuretés dans la soudure</li> <li>- Incompatibilité entre le métal d'apport et le métal de base</li> <li>- Trop de retrait après le Soudage</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Bonne mesure des angles et des chanfreins</li> <li>- Préchauffage avant le soudage</li> <li>- Bon choix du métal d'apport</li> <li>- Refroidissement lent</li> <li>- Recuit après soudage</li> </ul> |
| Fissuration à froid | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Hydrogène piégé dans la soudure</li> <li>- Contrainte résiduelles importantes</li> </ul>                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Préchauffage et chauffage au cours du soudage</li> <li>- Refroidissement lent</li> <li>- Traitement thermique après soudage (relaxation, dégazage)</li> </ul>                                        |

#### II.10. Le soudage à l'arc submergé :

Appelé le soudage SAW (submerged arc welding).Ce procédé de soudage est pareil au procédé TIG, il est basé sur la création d'un arc électrique mais avec une poudre protectrice Dans ce procédé le flux est utilisé pour protéger l'arc durant la fusion du fil. Le stick out (distance fil/pièce) est approximativement de 20 mm mais dans certains cas il peut être considérablement augmenté.

##### ❖ Avantages :

Grande productivité : - Intensité très élevée dans certaines applications ;

- Auto nettoyage du cordon aisé.

Grande qualité : - Forte pénétration ;

- Excellentes propriétés mécaniques.

Bon Environnement : -Pas ou peu de fumée ;

-Facile d'utilisation

## ❖ Inconvénients

- Usage limité à la préfabrication en atelier
- Limité aux joints à plat (angle et bout à bout)

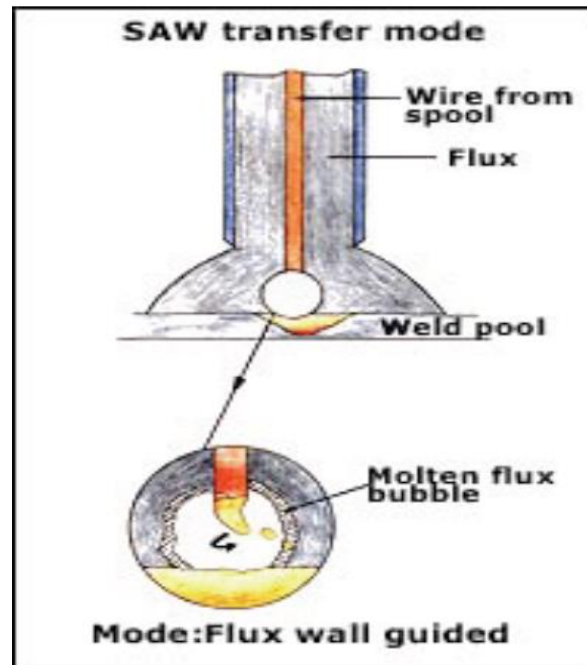


Figure II.7 : Procédé de soudage à l'arc submergé SAW

## II.11. Le soudage TIG :

### II. 11.1. Définition :

Le soudage à l'électrode réfractaire est communément appelé soudage TIG (Tungsten Inert Gas). Dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par GTAW ou (Gas Tungsten Arc Welding). On le désigne souvent en France par soudage à l'argon.

Ce procédé se caractérise par la création d'un arc électrique dans une veine de gaz inerte. L'électrode réfractaire en tungstène peut contenir des éléments d'addition comme le thorium ou l'yttrium qui favorisent l'émission électronique. L'arc et le bain fondu sont protégés de l'atmosphère ambiante par l'utilisation d'un gaz neutre. L'argon est le gaz le plus couramment utilisé mais il peut être parfois mélangé avec de l'hélium ou de l'hydrogène pour améliorer la soudabilité.

L'électrode n'est pas fusible et ce procédé peut s'appliquer avec ou sans métal d'apport. [34]

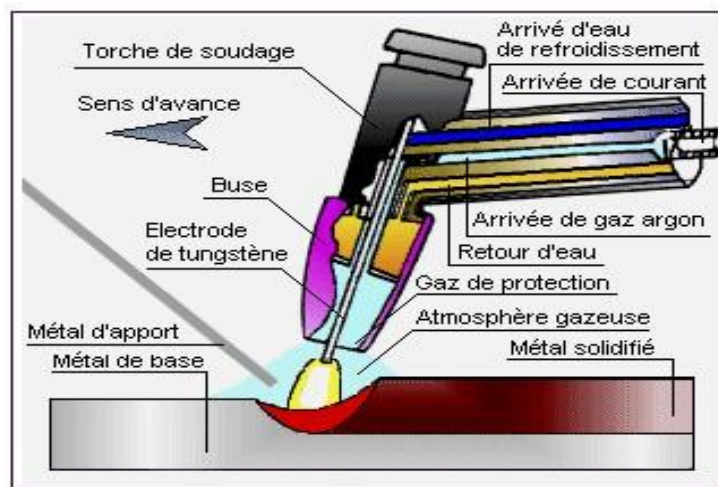
### II.11.2. Procédé

Le principe du soudage à l'électrode réfractaire est représenté sur la figure II.8 sous sa forme manuelle. L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires. Un arc TIG est visible et nécessite une protection.

#### L'opération s'exécute avec ou sans métal d'apport

- l'opérateur tient la torche d'une main et de l'autre le masque de protection.
- avec apport de métal (fil métallique), l'opérateur tient la torche d'une main, introduit de l'autre le fil d'apport dans le bain de fusion ; dans ce cas il a un casque spécial. En polarité directe, l'électrode est meulée en pointe côté soudage. Elle se forme en boule pour le soudage des alliages d'aluminium en courant alternatif ou en polarité inverse.
- L'opération se conduit de la façon suivante : l'opérateur place la torche en regard du point de départ en prenant soin de maintenir l'extrémité de l'électrode à quelques millimètres du métal à fondre, valeur approximative de la longueur d'arc. Il actionne ensuite l'interrupteur de torche, ce qui a pour effet d'ouvrir le circuit du gaz, de fermer le contacteur de la source, la tension à vide apparaissant alors entre pièce et électrode, puis de fermer le circuit d'amorçage.
- Ce circuit a pour rôle de produire entre l'électrode et la pièce une étincelle de faible puissance et de haute fréquence, pendant le temps (très bref) nécessaire à l'établissement du courant de soudage dans le circuit. Le bain fondu se forme et l'opération de soudage peut alors se conduire.
- Le soudage TIG produit une simple fusion caractérisée par sa largeur et sa pénétration. On réalise un apport de métal en introduisant directement dans le bain un fil de même nature que le métal de base. Ce fil qui fait dès son arrivée n'a aucune liaison avec le circuit de soudage. Il n'est pas une électrode et son taux de dépôt est indépendant de la puissance de l'arc. Ce fait est une des caractéristiques importantes du procédé à électrode réfractaire qui le distingue des procédés à électrodes fusibles.
- De même que les procédés à fils fusibles, le procédé TIG peut s'automatiser facilement.
- Le procédé TIG s'applique à tous les métaux soudables.

- Les courants généralement employés vont de quelques ampères à 400 A environ en courant continu (pour le soudage du cuivre, les intensités nécessaires sont de l'ordre de 600 à 800 A). En courant alternatif, la gamme utile est comprise entre 5 et 525 A. Sa puissance limitée à une vingtaine de kilowatts et son apport de métal séparé le réservent à des épaisseurs généralement faibles, de quelques millimètres. Son coût élevé, relativement aux autres procédés et dû essentiellement au coût du gaz de protection, fait qu'on le réserve aux applications requérant qualité et précision.



**Figure II.8 : Torche de soudage TIG [35]**

### II.11.3. Matériels

Le matériel nécessaire dans ce procédé est le suivant :

- Un pistolet à souder,
- Un générateur HF (haute fréquence),
- Une alimentation électrique,
- Un gaz de protection,
- Un équipement de contrôle.

- **Le pistolet à souder**

Le pistolet à souder doit être parfaitement isolé et facile à manier par l'utilisateur. Il existe deux types de pistolet à souder : le pistolet à refroidissement par air (l'intensité maximale de soudage est de 200A), et le pistolet à refroidissement par eau (l'intensité maximale de soudage est de 400A).

- **L'équipement de contrôle**

L'équipement de contrôle dépend essentiellement du degré d'automatisation du processus de soudage. Ces équipements possèdent plusieurs systèmes d'asservissement qui assurent le contrôle automatique de la durée de postgaz et de pré-gaz de protection destiné à empêcher l'oxydation de l'électrode et du bain de fusion, le bon fonctionnement de générateur dans la descente ou la remonte du courant pour le remplissage optimal de cratères.[36]

- **L'électrode**

Dans cette procédure, l'électrode utilisée doit respecter certaines caractéristiques techniques:

- Une faible résistance électrique,
- Un point de fusion élevé,
- Une forte émission électrique,
- Une bonne conductivité thermique.

L'électrode en tungstène répond mieux à ces exigences. Cependant l'ajout de certains additifs améliore considérablement certaines caractéristiques.

**Tableau II.3 :** Exemples d'électrodes de soudage TIG conformes ISO 68 48[37].

| Additif   | Proportion | Le courant utilisé            | Code de couleur |
|-----------|------------|-------------------------------|-----------------|
| Thorium   | 2 %        | Courant continu               | Rouge           |
| Zirconium | 0.8 %      | Courant alternatif            | Marron          |
| Lanthane  | 1 %        | Courant continu et alternatif | Noir            |
| Cérim     | 2 %        | Courant continu et alternatif | Gris            |

Les électrodes en tungstène pur sont utilisées pour le soudage de matériaux légers par un courant alternatif. L'ajout de 1% à 2% de l'oxyde de thorium dans l'alliage de l'électrode en tungstène améliore la stabilité de l'arc. En revanche, le meulage des électrodes qui contient de thorium présente un danger pour l'opérateur, parce que le thorium est radioactif. On peut utiliser à la place du thorium des oxydes non radioactifs tels que l'oxyde de zirconium, l'oxyde de cérium ou l'oxyde de lanthane.

- **Le métal d'apport**

Pour soudage des pièces de faible épaisseur (moins de 4 mm), l'utilisation de métal d'apport n'est pas nécessaire parce que le joint est entièrement formé par le métal fondu de la pièce à souder.

Pour le soudage des pièces épaisses l'utilisation d'un matériau d'apport sera importante pour former le joint de soudure. La qualité de la soudure peut être améliorée par le préchauffage du fil d'apport.

- **Le gaz de protection**

Le gaz de protection utilisé pour souder les aciers non alliés, faiblement alliés, ou inoxydables est l'argon pur. Pour le soudage des aciers inoxydables duplex, on ajoute de l'hélium pour améliorer le transfert de chaleur.

Dans certaines conditions, l'utilisation de l'hélium pur comme gaz de protection est préférable pour réaliser des soudures horizontales et en corniches.

- **L'alimentation :**

Le soudage TIG se fait sous deux types d'alimentation électrique, soit par un courant continu avec une électrode dont la polarité est négative, soit par un courant alternatif.

- **Courant continu**

C'est le type de courant le plus utilisé, appelé également soudage en polarité directe (DCSP, direct ccurrent straight polarity), L'électrode est reliée au pôle négatif du générateur. Le courant continu convient le soudage des aciers, des aciers inoxydables et le cuivre. Cette alimentation est contrôlée électroniquement au moyen d'un inverseur ou d'un montage redresseur à thyristor [38].

Dans certains cas très rares, la pièce devient cathode et l'électrode devient anode.

C'est qu'on appelle le soudage en polarité inverse (DCRP, direct ccurrent reverse polarity). Ce type d'alimentation est utilisé pour détruire la couche d'oxyde qui se forme à la surface du joint soudé. C'est le cas des alliages en aluminium [39].

- **Courant alternatif**

Ce type de courant est utilisé pour le soudage des alliages en aluminium ou en magnésium. L'alternance de polarité de courant permet de faire le contrôle de pénétration et la désoxydation au moment du soudage [40].

**II.11.4.Domaines :**

Le procédé TIG convient à tous les matériaux, sauf le plomb et le zinc. Il est utilisé surtout pour le soudage des aciers inoxydables, des métaux légers tels que les alliages en aluminium et en magnésium.

Les outils de mécano soudeur TIG sont très utilisés pour le soudage des tuyaux et des plaques tubulaires dans les échangeurs de chaleur. Le soudage TIG se caractérise par la stabilité de son arc ; cela donne la facilité de souder dans n'importe quelle position.

Le soudage sans le métal d'apport est possible dans certains cas. Le procédé de soudage à l'arc TIG est surtout utilisé pour le soudage des tôles minces, et plus particulièrement en métaux difficiles à souder, du fait que ce procédé entraîne moins de déformations que le chalumeau.

L'emploi de gaz rares onéreux (hélium et argon) fait que ses applications sont réservées aux métaux nobles et assemblages « précieux ». Parmi ces métaux, on trouve les aciers inoxydables et réfractaires, les alliages de nickel, d'aluminium, de magnésium, de titane, de cuivre.

Le procédé est employé dans les domaines les plus importants comme l'industrie nucléaire, la construction aéronautique et aérospatiale, la construction navale ou l'industrie automobile, la réalisation des ouvrages alimentaires, la chaudronnerie d'aciers inoxydables, la carrosserie.....etc.

**II.11.5.Avantages et inconvénients du soudage TIG :****❖ Avantages :**

La grande qualité des soudures obtenues par le soudage TIG a fait de celui-ci un procédé idéal pour le soudage de presque tous les métaux ; il ne requiert que peu et même parfois aucun nettoyage après soudage.

Le soudage TIG s'exécute facilement dans toutes les positions sans aucune projection de métal ; les soudures se font sans emploi de laitier éliminant ainsi les inclusions de celui-ci et le bain de fusion est étroit et la vitesse de soudage relativement élevée.

En raison du gaz inerte, on peut dire que les émanations de vapeur et de fumée toxique sont éliminées dans la plupart des cas. Le dépôt de soudure est dense et le procédé permet d'exécuter les soudures sans porosité même sur des métaux difficilement soudables, tels les alliages de titane, l'aluminium et le zirconium. Enfin, le procédé est aussi idéal pour effectuer

des réparations ou fabriquer de petites séries de pièces. [40]

❖ **Inconvénients :**

Les procédé du soudage TIG consomme une énergie du soudage supérieure au celle du MIG/MAG, en plus, sa productivité est inférieure à la productivité du procédé MIG/MAG  
Le procédé TIG est inconvenable dans les milieux poussiéreux et enfumées.

## **II.12. La soudabilité des tubes en acier x70 :**

Il n'est pas toujours possible d'assurer la stabilité et la bonne qualité des joints de soudure, il y a toujours la possibilité qu'une partie des défauts des joints, non détectés par les contrôles, constitue un danger potentiel pour l'intégrité de la conduite. Les joints de soudure sont sollicités par des chargements complexes durant le transport, le bardage des tubes, la construction et l'exploitation de la conduite.

Les modifications les plus importantes de la structure et des propriétés du métal de base résultant de l'échauffement et du refroidissement dans la zone adjacente au cordon sont : la diminution de la plasticité, de la résilience et l'accroissement de la tendance à la formation des fissures à froid et à chaud, Les matériaux de soudage et les processus de thermo-déformations ayant lieu lors du soudage des tubes provoquent l'hétérogénéité des propriétés mécaniques de la ZAT, où plus de 85% des ruptures des oléoducs et Gazoducs sont observées. La capacité portante des joints dépend de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques, de la qualité de la forme du cordon, de l'épaisseur relative des sous couches.

A cette hétérogénéité s'ajoutent les concentrations de contraintes et les déformations qui réduisent d'avantage la capacité portante des joints de soudures. Ces concentrations dépendent de la présence des défauts technologiques, des formes insatisfaisantes des cordons et d'assemblages incorrects des tubes. Les contraintes dues aux variations de la température des parois des tubes, ajoutées aux contraintes résiduelles peuvent conduire sur certains tronçons de conduite de Gazoducs à l'accumulation des déformations plastiques dans les soudures circulaires de tubes de mauvaise qualité et provoquer la rupture.

De telles ruptures sont observées sur presque toutes les conduites en service à partir de la dixième année d'exploitation, jusqu'à la trentième année et plus particulièrement dans les régions froides. D'où l'importance de la qualité des cordons de soudure des tubes, la technologie et le régime de soudage mis en place, ainsi que les propriétés de plasticité du métal du cordon.

La soudabilité en construction des pipelines doit être considérée sous deux aspects. Le

premier est caractérisé par la soudabilité lors de la réalisation de la conduite et est lié aux opérations technologiques et techniques, d'exécution des joints de soudure, respectant certaines normes. Le deuxième est caractérisé par le comportement des joints de soudure en service.

Ainsi la soudabilité en construction des pipelines est une caractéristique complexe, qui reflète la réaction de l'acier des tubes au processus de soudage. Elle dépend de la technologie de réalisation de la construction et détermine l'aptitude d'un matériau étudié pour la réalisation d'une conduite destinée à fonctionner dans des conditions données. Les matériaux des tubes sont en général des aciers améliorés par traitement thermomécanique, dont la soudabilité est évaluée par un ensemble d'indices, les plus importants sont : la réaction de l'acier au cycle thermique de soudage, la ténacité des joints de soudure à la formation de fissures à froid et la ténacité à la rupture fragile. L'action du cycle thermique du soudage est accompagnée par des modifications de la structure et des propriétés du métal soudé. La chute importante des températures maximales conduit à l'apparition, dans la ZAT, des hétérogénéités structurales et mécaniques. L'échauffement dû au soudage conduit au développement des processus qui font équilibrer la structure et modifier les propriétés mécaniques.

En même temps, se déroulent des processus de grossissement du grain, de ségrégation d'éléments additifs et leur redistribution par diffusion entre les diverses phases. La position de la partie où il y a plus de changement de résistance dans la ZAT est déterminée par la composition chimique et la classe structurale de l'acier amélioré par traitement thermomécanique. Pour les aciers des tubes, cette partie coïncide avec la partie de recristallisation incomplète du métal de base. Les paramètres du cycle thermique de soudage ayant une influence importante sur le degré de modification de la structure et des propriétés du métal de base sont, pour la partie adjacente du cordon de soudure: la température maximale d'échauffement, la vitesse d'échauffement, le temps durant lequel le métal reste à la température d'accroissement intensif de grain lors de l'échauffement et le refroidissement, ainsi que le temps sommaire d'échauffement et de refroidissement, la vitesse de refroidissement du métal dans l'intervalle de température de faible stabilité de l'austénite [41].

### III.1. Introduction

L'étude du comportement mécanique des matériaux a pour but de connaître leurs réponses à une sollicitation donnée. Les variables mises en jeu dans ce domaine sont :

- le tenseur des contraintes
- le tenseur des déformations

Cette étude nous permet aussi de connaître les propriétés mécaniques du matériau étudié tels que la limite d'élasticité, la limite à la rupture et la limite d'élasticité conventionnelle et cela ne peut pas être effectué sans la réalisation des différents essais mécaniques.

### III.2. Les essais mécaniques

#### III.2.1. L'essai de traction

L'essai de traction est l'un des essais mécanique les plus fréquents. Il sert à déterminer avec précision plusieurs propriétés mécaniques des matériaux importantes en conception.

L'essai de traction est mis en œuvre afin de connaître le comportement des matériaux utilisés pour cette étude. Il permet d'accéder aux propriétés élastiques de rigidité et de rupture dans les directions de sollicitation choisies pour l'essai. C'est un essai classique de caractérisation mécanique car il est simple à mettre en œuvre et permet d'accéder aux propriétés les plus intéressantes pour le dimensionnement de structure dans des cas simples.

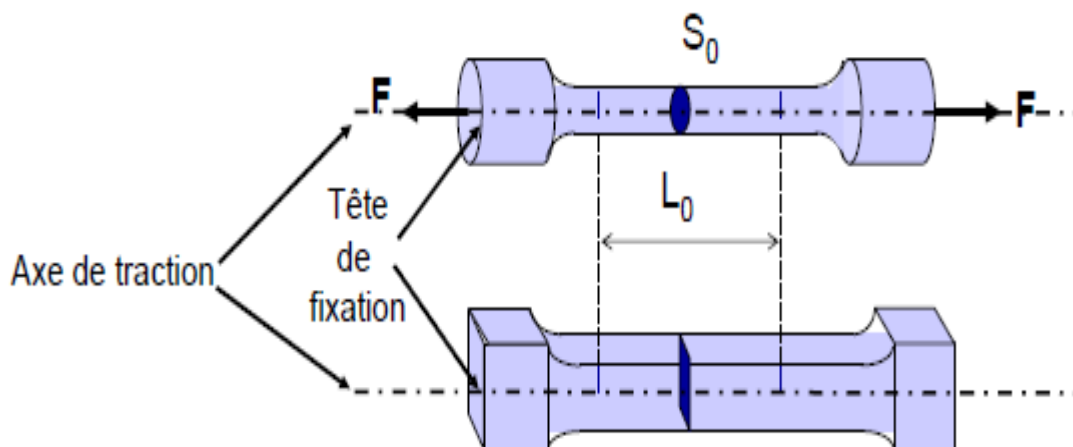


Figure III.1 : Principe d'essai de traction

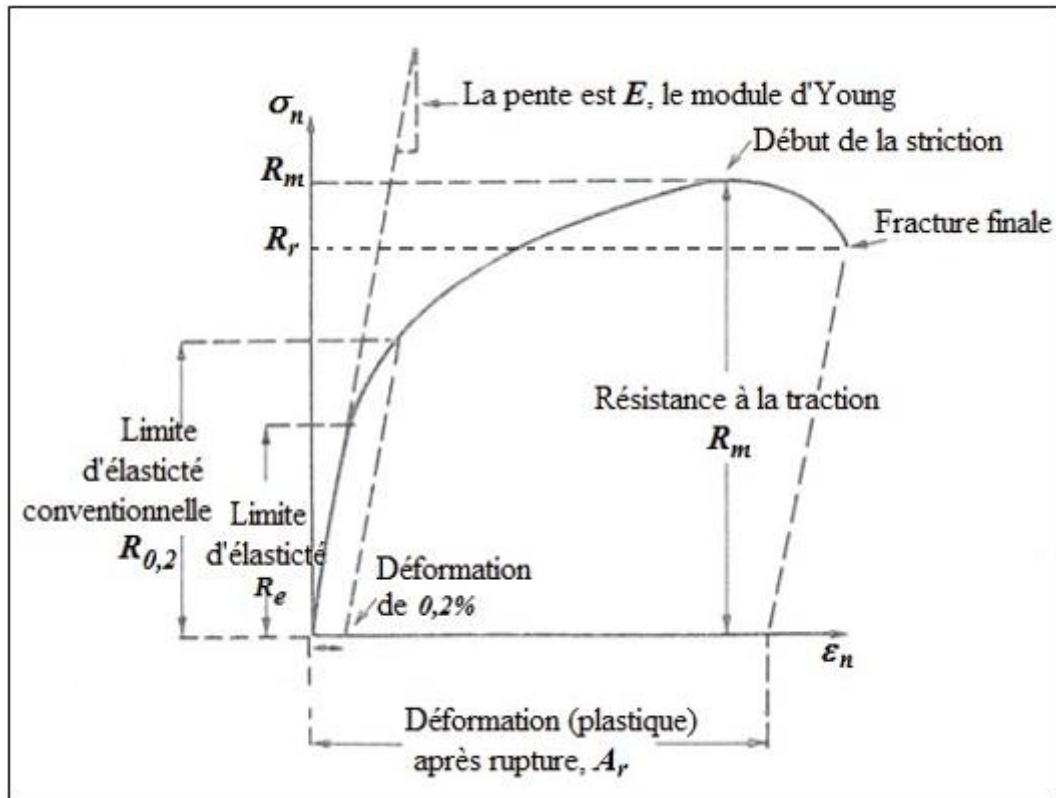


Figure III.2 : Courbe théorique de traction [42]

- **$R_e$**  (MPa) est la limite de proportionnalité ou **limite élastique**. Elle est bien marquée pour les matériaux ductiles.  $R_e$  correspond au seuil d'écoulement plastique.
- **$R_m$**  est la **résistance limite** à la traction. Cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance à la fatigue
- **$R_e$**  est atteinte quand on observe la première chute de l'effort lors de l'essai. En l'absence de ce phénomène, quand OA n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité.
- **$R_{0,2}$**  qui correspond à un allongement plastique de 0,2%

On ne peut pas parler de la traction sans passer par la loi de HOOKE

La loi de Hooke a été généralisée par Cauchy (1789-1857) et est écrite sous la forme :

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

### II.2.1.1. La courbe de traction :

L'essai de traction permet d'avoir des résultats expérimentaux de l'allongement des matériaux étudiés en fonction de la charge appliquée. Les résultats de ce test sont représentés par une courbe qu'on appelle « courbe de traction ». On peut tracer après le test deux sortes de courbes de traction :

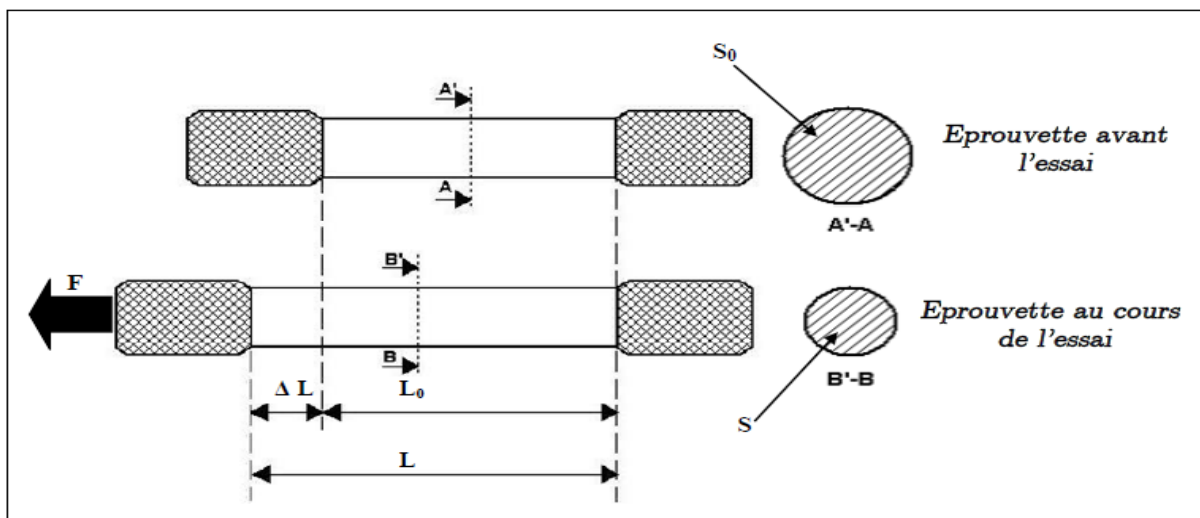
- la courbe conventionnelle,
- la courbe rationnelle.

#### a) La courbe conventionnelle :

Cette courbe dépend des résultats bruts de l'essai ; elle est tracée en fonction des valeurs nominales ( $\epsilon_n$  ;  $\sigma_n$ ) telles que :

$\epsilon_n$ : la déformation longitudinal, tel que:  $\epsilon_n = \Delta L / L_0$

$\sigma_n$  : la contrainte normale



**Figure III.3 :** Variation de la longueur de l'éprouvette pendant l'essai de traction. [43]

$L_0$  : la longueur utile initiale de l'éprouvette,

$L$  : longueur de l'éprouvette pendant l'essai de traction,

$\Delta L$  : l'allongement,

$F$  : la force de traction appliqué sur l'éprouvette,

$S_0$  : la section initiale de l'éprouvette,

$S$  : la section de l'éprouvette dans la zone utile pendant l'essai.

**b) La courbe rationnelle**

Dans la réalité, la section  $S$  et la longueur utile de l'éprouvette varient à chaque instant. Donc il est intéressant de quantifier cette variation en fonction de la force appliquée. De plus, la déformation nominale n'a pas de sens physique car elle dépend de la géométrie de l'éprouvette. Il est avantageux de tracer la courbe de traction vraie, ou rationnelle, qui utilise les sections et les déformations réelles à chaque instant.

Cette courbe est déduite de la courbe conventionnelle en traçant la variation de la contrainte  $\sigma$  en fonction de la déformation du logarithme de la déformation  $\epsilon$ .

**c) Le passage de la force à la contrainte vraie**

La contrainte nominale  $\sigma_N$  est obtenue en divisant la force de traction  $F$  par la surface  $S_0$  de la section initiale de l'éprouvette :  $\sigma = \frac{F}{S_0}$

La contrainte vraie est obtenue en divisant la force de traction par la surface variable pendant l'essai :  $\sigma = \frac{F}{S}$

La relation entre  $\sigma$  et  $\epsilon_n$  :  $\sigma = \frac{F}{S_0} \sigma_n$

Si on considère que le changement de volume de la zone utile n'est pas significatif, on peut utiliser l'approximation suivante [44] :

$$V_0 = L_0 \cdot S_0 \approx L \cdot S = (L_0 + \Delta L) S$$

Où  $L$  et  $L_0$  représentent respectivement la longueur initiale et courante de la zone utile de l'éprouvette ; donc on arrive à cette relation :

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right)$$

**d) Le passage du déplacement à la déformation vraie :**

Si on calcule l'incrément de la déformation sur l'intervalle  $l, l+dl$ , c'est-à-dire, le passage d'une déformation  $\varepsilon$  à une déformation,  $\varepsilon + d\varepsilon$  on l'obtient en divisant l'allongement  $dl$  par

la longueur  $l$  [45]: 
$$d\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

Si on somme depuis le début de l'essai de traction, on obtient :

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

Ou encore :

$$\varepsilon = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right)$$

On résume les relations permettant de passer des grandeurs vraies aux grandeurs nominales, en prenant l'hypothèse d'une déformation sans variation de volume :

$$\begin{cases} \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_n) \\ \sigma = \sigma_n (1 + \varepsilon_n) \end{cases}$$

**III.2.2. L'essai de dureté**

La dureté est la caractéristique mécanique d'un matériau à s'opposer à la déformation plastique provoquée par des contacts de la couche superficielle. L'importance de cette caractéristique mécanique fait que les essais de dureté sont d'une grande utilité pour le métallurgiste et pour les industriels utilisant et fabricant les pièces métalliques. La dureté n'est pas qu'une simple propriété par contre ses méthodes de mesure sont très simple à réaliser et leurs caractéristiques est peu destructif (moins que celui de l'essai de traction ou de compression).

L'essai de dureté est largement utilisé sur les métaux. Il caractérise la résistance qu'oppose le matériau à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui.

Ainsi, pour des conditions expérimentales données, la dureté du métal sera d'autant plus grande que la pénétration du corps sera faible.

Cet essai consiste à exercer une pression par l'intermédiaire d'un pénétrateur et à mesurer la surface de l'empreinte obtenue). La dureté vraie est définie par le rapport de la force à la surface projetée de l'empreinte  $S$  (la dureté Vickers,  $H_v$  a malheureusement été définie comme le rapport de  $F$  à la surface totale de l'empreinte. La définition est restée, et il existe des abaques pour relier  $H$  à  $H_v$ ). Il existe plusieurs types de mesure de dureté tels que l'essai du Brinell, Rockwell et Vickers [46].

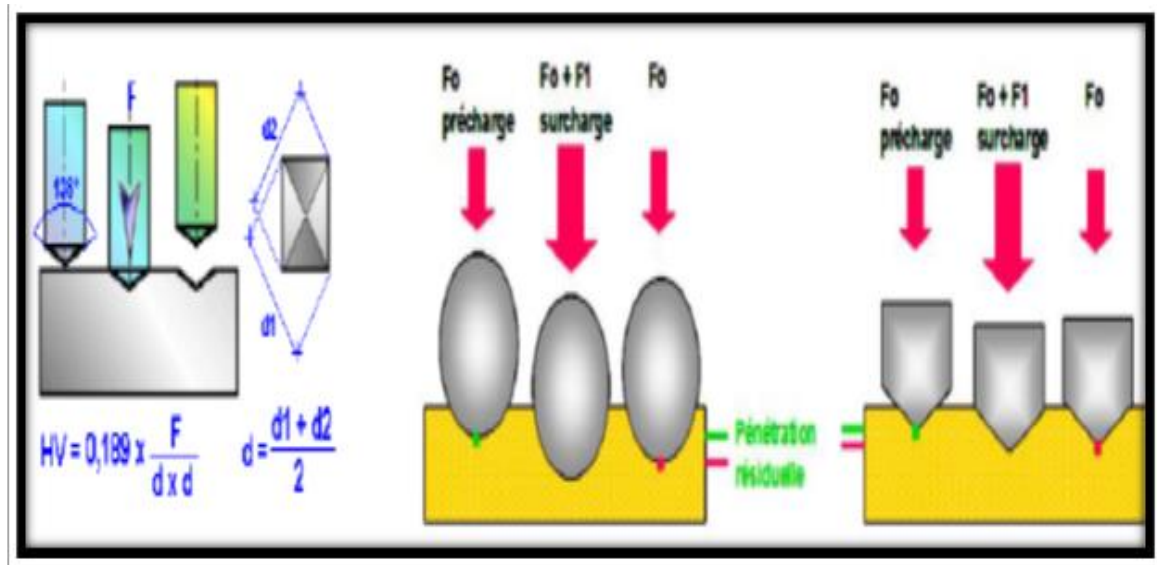


Figure III.4 : Principe d'essai de dureté

### III.3. Types des comportements mécaniques

Chaque matériau suit selon sa structure un comportement précis, on distingue :

#### III.3.1. Comportement élastique

Dans le domaine élastique, la déformation longitudinale est proportionnelle à la contrainte. Ce comportement est traduit par la relation unidimensionnelle.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$E$  : étant le module de Young (exprimé en Mpa).

### III.3.2. Comportement plastique

Lorsque la limite d'élasticité est dépassée, les atomes du réseau cristallin ont changé de place sous l'action d'un effort de cisaillement.

La prise en compte des défauts du cristal, notamment des dislocations, est indispensable pour comprendre le comportement plastique.

Lorsqu'une déformation plastique est provoquée, on constate que la résistance à la déformation augmente car :

- les dislocations interagissent entre elles
- de nouvelles dislocations prennent naissance, venant augmenter les interactions.

Un comportement est dit plastique lorsque d'une part le matériau est capable de présenter des déformations irréversibles et que d'autre part la contrainte d'écoulement plastique ne dépend pas de la vitesse de déformation.

Les matériaux métalliques présentent généralement un comportement plastique pour des températures inférieures à la moitié de leur température de fusion (en K). En outre ils présentent presque systématiquement aussi un domaine d'élasticité. Au-delà de  $T_f / 2$  la contrainte d'écoulement devient significativement dépendante de la vitesse de déformation et le domaine d'élasticité négligeable, le comportement est alors qualifié de visco-plastique.

Cette capacité à présenter des déformations plastiques est extrêmement intéressante car elle permet la mise en forme ou l'assemblage de pièces par déformation plastique. D'autre part, cela contribue à la résistance à la rupture [42].

### III.4. Les classes de matériaux et leurs propriétés

On classe les matériaux en trois classes correspondant approximativement à trois types de comportement :

**Tableau III.1 : Les classes des matériaux [47]**

| Matériaux          | Comportement        | Propriétés                 |
|--------------------|---------------------|----------------------------|
| Verre et céramique | Dureté et fragilité | Isolant et réfractaire     |
| Métaux et alliages | ductilité           | Conducteurs et réflecteurs |
| polymères          | déformabilité       |                            |

### IV.1. Introduction

Dans cette partie nous faisons le point sur les différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation de l'échantillon soudé, la détermination de ses propriétés mécaniques et métallographiques.

### IV.2. Soudage de tubes

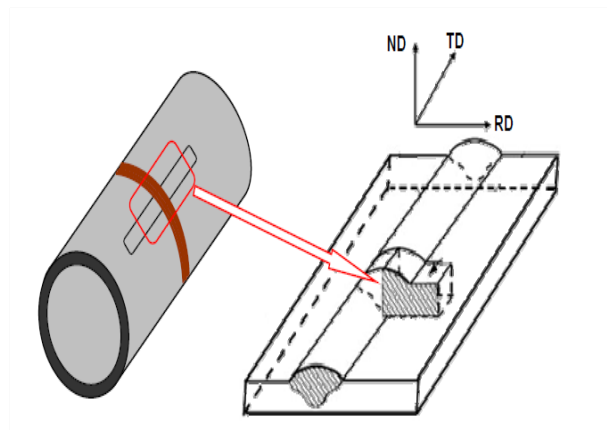
Le soudage des tubes a été effectué à ENGTP (Entreprise Nationale des Grands Travaux Pétroliers), la méthode utilisée pour l'assemblage était en 2 parties :

- la première passe par la méthode du soudage TIG (Tingesten Inert Gaz)
- les autres passes (passes de beurrage et finition) sont effectuées en utilisant le procédé de soudage SAW (Submerged Arc Welding)

### IV.3. Mode de prélèvement d'échantillon

La connaissance des propriétés d'un matériau nécessite une évaluation de la forme, de la distribution, de la quantité et de la nature des constituants (phases) qui le composent. Pour une technique d'analyse donnée, le mode de prélèvement de l'échantillon à partir des composants industriels dépend de l'information recherchée. Dans le cas du soudage, le suivi de l'évolution structurale en fonction des passes de soudage nécessite le plus souvent un prélèvement d'échantillon dans la direction transverse à celle du soudage. Pour notre travail, nous avons effectué des coupes transversales dans le cordon de soudure. Le sens de soudage correspond à la direction TD de l'échantillon. Le sens de prélèvement de l'échantillon par rapport aux directions RD, TD et ND est représenté schématiquement dans la figure IV.1. Ce mode de prélèvement a été adopté pour toutes les observations microscopiques effectuées dans ce travail.

**Figure IV.1:** Représentation schématique du mode de prélèvement d'échantillon d'un tube soudé.



## IV.4. Caractérisation métallographique

### IV.4.1. Préparation de l'échantillon

Après découpage selon la démarche décrite ci-dessus, l'échantillon a ensuite subi une succession d'étapes de préparation pour l'observation au microscope optique :

- ✓ Polissage mécanique sous eau et sur papier abrasif de granulométrie décroissante jusqu'à 4000.
- ✓ Polissage de finition réalisé sur drap en feutre avec utilisation d'alumine de granulométrie décroissante de 0.5 à 0.1  $\mu\text{m}$ .
- ✓ Révélation de la microstructure au moyen d'attaques chimiques : En microscopie optique le choix du réactif d'attaque chimique dépend des détails microstructuraux recherchés (contraste de phase, joints de grains, précipités, ...etc.). Pour l'analyse microstructurale des soudures de l'acier x70 utilisé dans ce travail, une attaque chimique a été utilisée qui est (L'attaque ordinaire à la solution « Nital »).

### IV.4.2. Polissage de l'échantillon

#### IV.4.2.1. Polissage grossier

Appelé aussi polissage grossier ou abrasion. Le polissage sert à enlever la couche externe du matériau jusqu'à l'atteint d'un état du miroir pour faciliter l'observation microscopique de la microstructure du matériau. L'échantillon a subi un cycle de polissage réalisé sur 2 polisseuses. Une polisseuse de type MECATECH 334 du laboratoire de recherche en fiabilité des équipements pétroliers et matériaux (LRFEPM/FHC/UMBB), tournant de 100 à 600 tour/min sur lequel est collé un papier abrasif de granulométries :80,120,180,220,400,600 et 800. Le deuxième polissage a été réalisé au laboratoire de mécanique et métallurgie du centre de recherche en technologies industrielles (CRTI) sous lubrification continue (jet d'eau) pour éviter tout échauffement local suite au frottement, en utilisant des papiers abrasifs de différents granulométrie:1000,1200,2400 et 4000. Les papiers ont été utilisés successivement dans l'ordre décroissant de la granulométrie en prenant soin de faire tourner l'échantillon de 90° afin d'éliminer les rayures laissées par le polissage précédent. Sur chaque papier, on maintient en contact l'échantillon pendant 20 minutes. La procédure est décrites sur le tableau suivant :

**Tableau IV.1:** Différentes étapes du polissage

| N° d'opération du polissage | Granulométrie de Papier utilisé | La durée de L'opération | La vitesse du polissage |
|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1                           | 80                              | 20mn                    | 300trs/mn               |
| 2                           | 120                             | 20mn                    | 300trs/mn               |
| 3                           | 180                             | 20mn                    | 300trs/mn               |
| 4                           | 220                             | 20mn                    | 300trs/mn               |
| 5                           | 400                             | 20mn                    | 450trs/mn               |
| 6                           | 600                             | 20mn                    | 450trs/mn               |
| 7                           | 800                             | 20mn                    | 450trs/mn               |
| 8                           | 1000                            | 30mn                    | 500trs/mn               |
| 9                           | 1200                            | 30mn                    | 500trs/mn               |
| 10                          | 2400                            | 30mn                    | 500trs/mn               |
| 11                          | 4000                            | 30mn                    | 500trs/mn               |

**FigureIV.2:** polisseuse MECATECH 334  
(LRFEPM/FHC)**FigureIV.3 :** polisseuse STRUERS  
(DMM/CRTI)

#### IV.4.2.2. Polissage de finition

Dans cette phase, nous avons essayé de rendre la surface polie précédemment finie par un polissage effectué par une pâte d'alumine répartie sur un drap.

#### IV.4.3. Révélation de la microstructure

Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance pour mettre en évidence les structures

#### IV.4.4. L'attaque chimique au Nital

Malgré la réalisation d'une opération du polissage mécanique (manuel) poussé, il est impossible de distinguer les différentes zones de joints soudé. Il est nécessaire de réaliser une attaque chimique qui facilite l'observation microscopique du joint soudé. Cette opération donne une différence de couleur entre les différentes phases, car elle est directement liée à la différence de vitesse de réaction des constituants. Cette attaque est réalisée par du Nital (5%) à la température ambiante pendant des durées de 10 à 30 secondes.

#### IV.4.5. Observation microscopique

Un microscope optique de marque NIKON éclipse équipé d'une caméra numérique permettant l'acquisition et la sauvegarde des différentes images a été utilisé. L'estimation des proportions des différentes phases est basée sur le traitement des images obtenues de l'attaque chimique :



**Figure IV4:** Microscope optique (Laboratoire de Métallurgie et Mécanique du CRTI).

#### **IV.4.5.1. Principe de fonctionnement**

La métallographie microscopique a pour but de mettre en évidence les constituants de la microstructure. La microscopie est faite à l'aide d'un microscope optique utilisant une source lumineuse qui envoie la lumière sur l'échantillon à travers un dispositif optique. Les rayonnements réfléchis par l'échantillon sont repris par la lentille objective qui donne une première image intermédiaire qui grâce à un miroir semi-réfléchissant, elle est renvoyée vers l'œil du manipulateur à travers une lentille oculaire. L'appareil permet également d'obtenir des photos sur un ordinateur à travers une caméra solidaire.

### **IV.5. Caractéristiques mécaniques**

La caractérisation mécanique consiste à effectuer des essais de traction et de dureté afin de déterminer les propriétés mécanique du matériau.

#### **IV.5.1. L'essai de traction**

##### **IV.5.1.1. La Réalisation d'essai**

Les essais de traction ont été réalisés au Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) à Chéraga sur une machine universelle de type ZWICK ROELL **Z050** (figure V.5). La gamme vitesse de déplacement de la traverse mobile était constante durant toute l'expérience.

Les résultats ont été recueillis par des capteurs et grâce à un logiciel, les données sont traitées puis affichées sur un écran d'ordinateur.



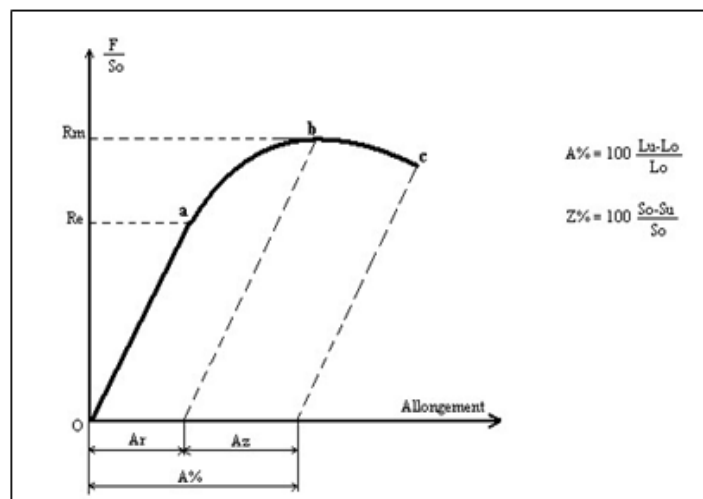
**Figure IV.5 :** Machine de l'essai de traction de type **INSTRON**.

L'essai de traction consiste à exercer une déformation croissante sur un barreau prismatique et à mesurer l'évolution de la force nécessaire pour le déformer jusqu'à sa rupture. L'examen du diagramme effort-déformation (ou courbe de traction, figure IV.6) fait apparaître un domaine élastique 'Oa' dans lequel les déformations sont réversibles et proportionnelles à la charge appliquée et un domaine plastique 'ac' dans lequel les déformations sont permanentes.

Les paramètres mécaniques déduits de cet essai sont :

- la limite d'élasticité  $R_e$ ,
- la résistance à la traction  $R_m$
- l'allongement à la rupture  $A\%$ .

**FigureIV.6 :** Courbe conventionnelle de traction



### Les éprouvettes de l'essai



**Figure IV.7 :** Eprouvettes de l'essai de traction.

### IV.5.2. L'essai de la dureté

#### IV.5.2.1. La réalisation de l'essai

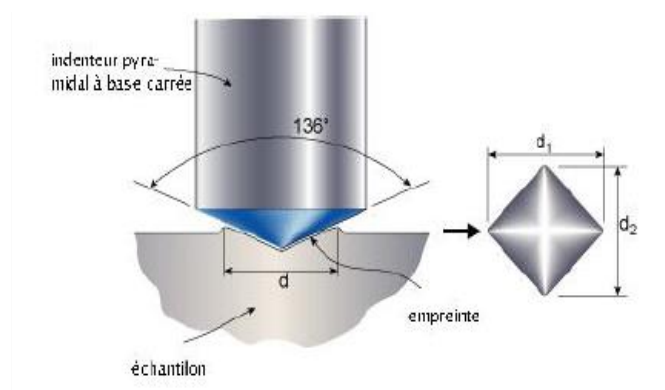
Les essais de la dureté du matériau ont été effectués sur une machine universelle de type INOVATEST NEMESIS 9000 au laboratoire de Mécanique et Métallurgie du CRTI, la machine est présentée dans la figure IV.8:



**Figure IV.8 :** Machine universelle de dureté INOVATEST NEMESIS 9000

L'essai de dureté est réalisé afin de mesurer la valeur de la dureté du matériau. La méthode utilisée pour la mesure de la dureté était la méthode de VICKERS. Cet essai consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de  $136^\circ$ , sous l'action d'une force connue (10 Kgf). On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur (figureIV.9).

La charge  $F$  utilisé était 10 Kgf dans un temps du maintien de 10 seconds, la valeur de dureté donc se calcule par la formule :  $H_v = 0,189 \times F/d^2$



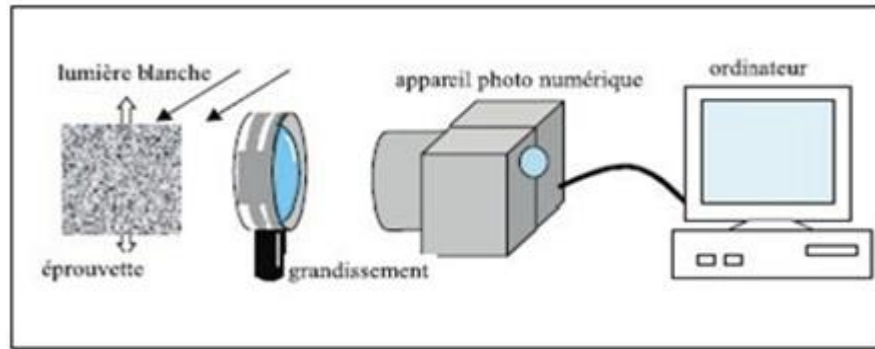
**FigureIV.9 :** Principe de mesure de dureté Vickers

## IV.6. La corrélation d'images

### IV.6.1. Principe

Le principe de cette méthode est très simple: on dépose sur l'objet à étudier un mouchetis, ensemble de taches bien contrasté (noir sur blanc). Une caméra CCD filme l'état initial, puis l'état actuel. Pour un ensemble de zones donné, un logiciel recherche le déplacement qui procure la meilleure corrélation entre les deux zones [48]:

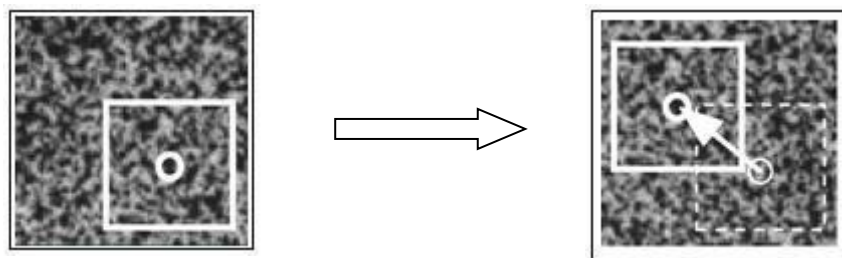
C'est le déplacement moyen de celle-ci (figure IV.10). La méthode est très simple à mettre en œuvre et permet la mesure sur de très grandes structures La précision peut atteindre jusqu'à  $10^{-4}$  en déformation [49].



**Figure IV.10 :** Schéma de principe de la technique de corrélation d'images [50].

L'extensométrie par corrélation d'images numériques est une technique assez nouvelle, et qui présente de grands avantages par rapport à les anciennes techniques d'extensométrie optique. Il s'agit de mesurer les champs de déplacements qui apparaissent lors d'un essai sur une éprouvette, à partir du film de l'expérience. Pour cela un logiciel va comparer deux images successives du film, et à partir des écarts de luminosité la valeur du déplacement est déduite.

Pour utiliser la technique de la corrélation d'image, on filme un essai avec une caméra. Ensuite, en comparant deux images successives (Figure IV.11 a et b), la mesure de la distance qu'a parcourue un point entre un temps  $t_0$  et  $t_0 + \Delta t$ . Pour le même point, cette opération est répétée pour les images suivantes. On peut alors obtenir le déplacement total. Ces calculs sont faits pour chaque point repéré par la caméra, on obtient alors le déplacement de la matière [51].



**Figure IV.11.a :** Image référence (initiale).

**Figure IV.11.b):** Image déformée (actuelle).

A partir du champ des déplacements, par calcul, on peut de même obtenir le champ de déformation de l'éprouvette ainsi que le champ des contraintes. La caractéristique principale de cette technique est que l'on obtient des champs de déplacements ou de déformations [52]

L'intérêt de la corrélation d'images et de pouvoir visualiser les champs au sein d'une éprouvette.

#### IV.6.2. Démarche de l'essai

Pour réaliser les essais de traction, on a utilisé 3 éprouvettes, ces éprouvettes doivent être mouchetées en mettant des points presque équidistances dans le cordon de soudure. Le logiciel analyse les points et nous permet de visualiser le champ de déformation et de déplacement de points dans le cordons de soudures.

##### IV.6.2.1. Essai de traction sur éprouvette non-fissurée

C'est-à-dire on réalise l'essai de traction sur une éprouvette soudée non fissurée comme la montre la figure, on a réglé la vitesse d'avancement de la machine de la traction à une vitesse constante de 2mm/min :



**FigureIV.12:** Eprouvette de traction soudée non fissurée

##### IV.6.2.2. Essai de traction sur éprouvette avec fissure dans la ZF

On crée une fissure de 3 mm dans la zone fondue. La vitesse est réglée à 2 mm/min :



**FigureIV.14:** Eprouvette de traction avec fissure dans la ZF

##### IV.6.2.3. Essai de traction sur éprouvette avec fissure dans la ZAT

La fissuration maintenant est créée dans la zone affectée thermiquement du côté de la racine du joint soudé, on réalise l'essai de traction et suit la propagation de fissure dans l'éprouvette avec une vitesse d'avancement égale à 1 mm/min :



**Figure IV.15:** éprouvette de traction avec fissure dans la ZAT

### IV.6.3. Procédure de la méthode de corrélation d'image

Le programme de la corrélation d'image est un programme crée par Christoph Eberl de l'Université John Hopkins [53]

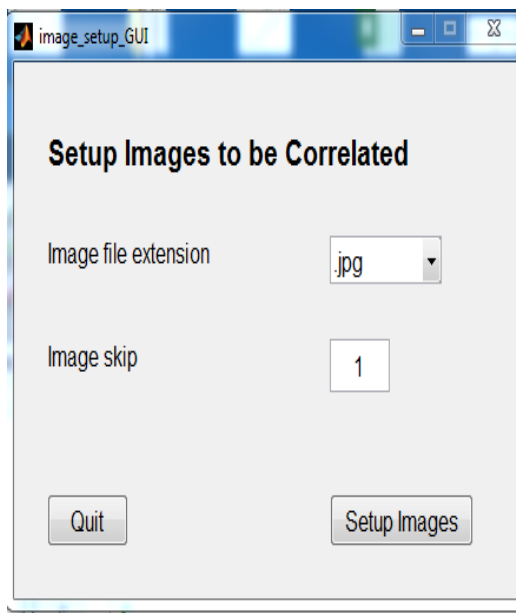
#### IV.6.3.1. Différentes étapes de la méthode

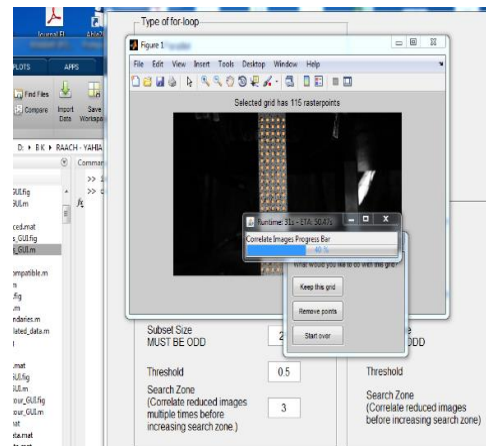
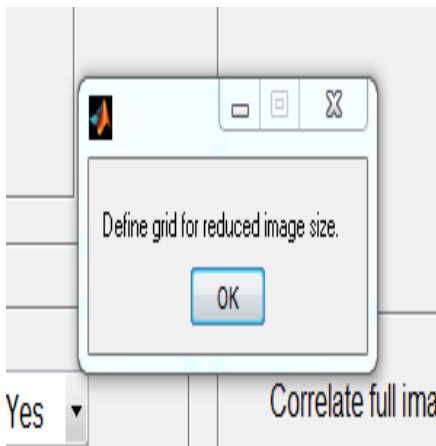
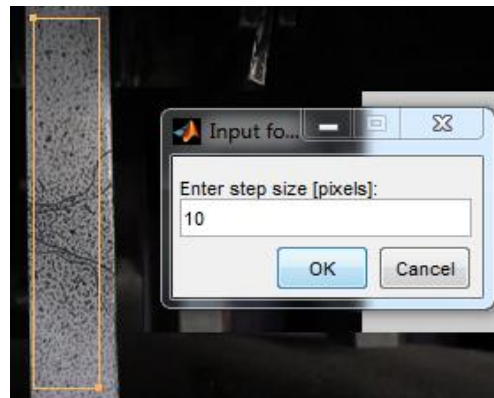
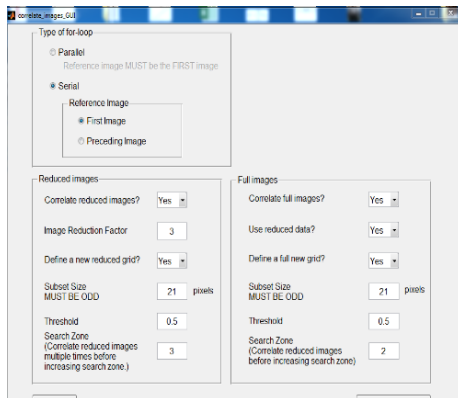
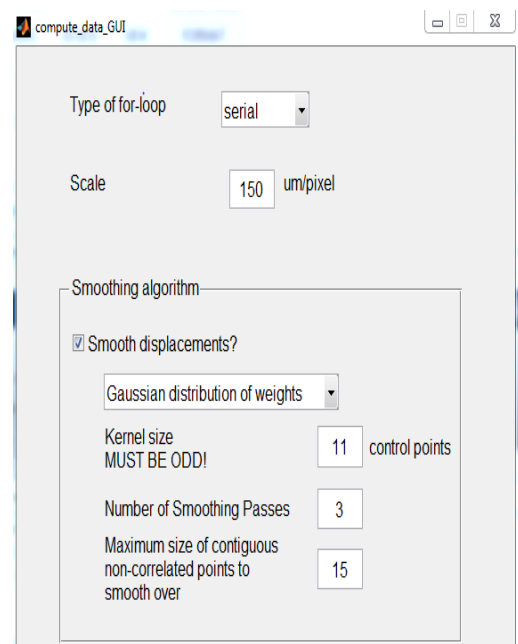
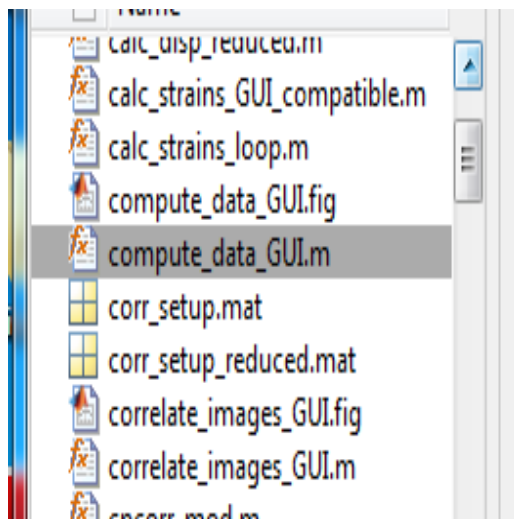
La méthode de corrélation d'image consiste à effectuer 4 étapes essentielles :

- la sélection de l'image (image)
- la corrélation d'image (correlate)
- le lancement du calcul (compute)
- le visualisation des résultats (visualise)

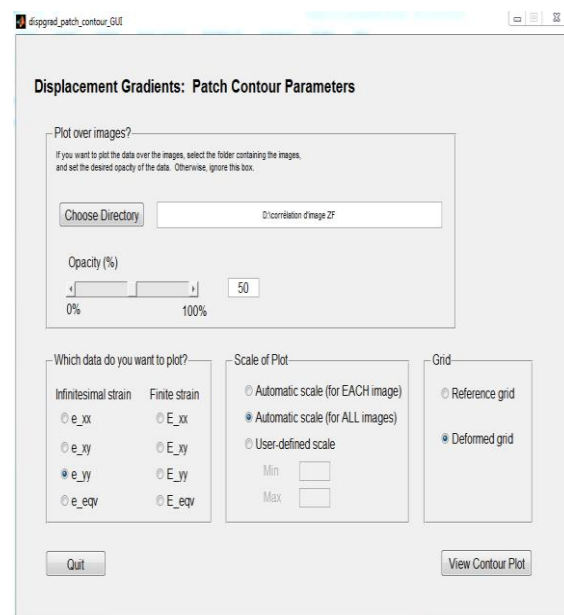
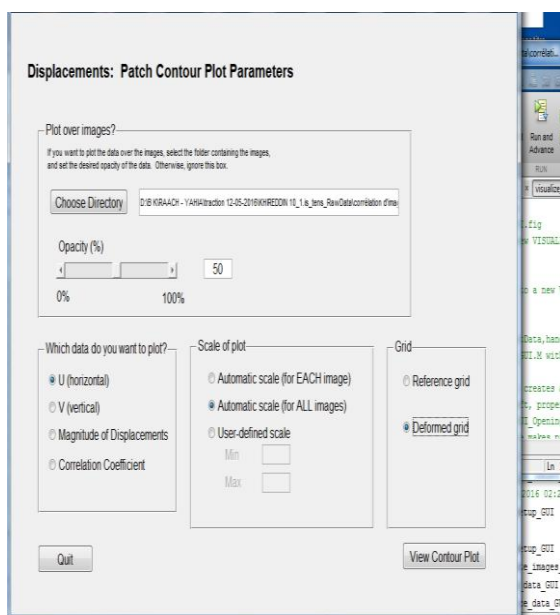
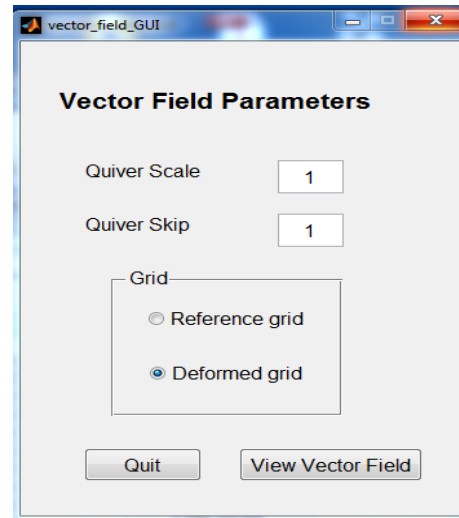
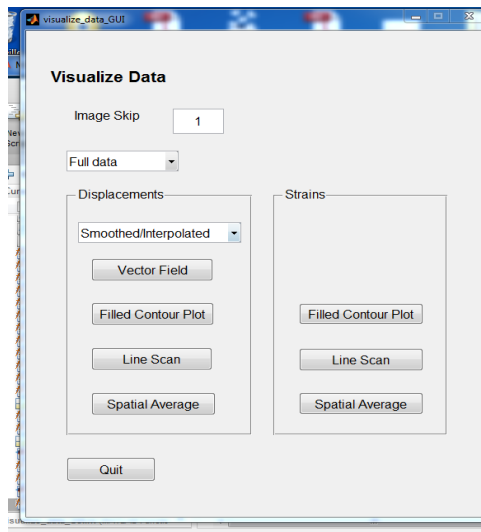
Après qu'on finalise les étapes précédemment indiquées on passe à l'extraction des différents courbes et graphes (vecteurs du déplacement, champ du déplacement champ des déformations...etc.)

#### -La sélection de l'image (image)



**-La corrélation d'image (correlate) :****-Le lancement du calcul (compute) :**

## -La visualisation des résultats (visualise) :



## V.1. Présentation du matériau utilisé

### V.1.1. Métallographie

#### V.1.1.1. Analyse chimique :

La composition chimique de l'acier étudié X70 tel que spécifié par la norme API 5L est donnée par le tableau V.1.

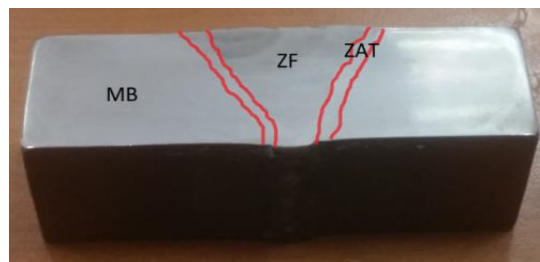
**Tableau V.1 :** Composition chimique du Métal utilisé (API 5L X70) selon l'API

| éléments | C    | Mn   | P    | S    | Ti   | Nb + V + Ti |
|----------|------|------|------|------|------|-------------|
| %        | 0.28 | 1.40 | 0.03 | 0.03 | 0.06 | ≤0.15       |

#### V.1.1.2. Macrographie de la soudure :

L'observation macroscopique permet de révéler les différentes zones du joint soudé qui sont : Métal de base, la Zone Affectée Thermiquement, la Zone Fondue (MB, ZAT, ZF).

La Zone affecté thermique qui est de largeur  $\approx 3\text{mm}$ , l'examen macroscopique n'a pas révélé des défauts de type : fissures, cavités, inclusions dans le métal fondu ou dans la ZAT.

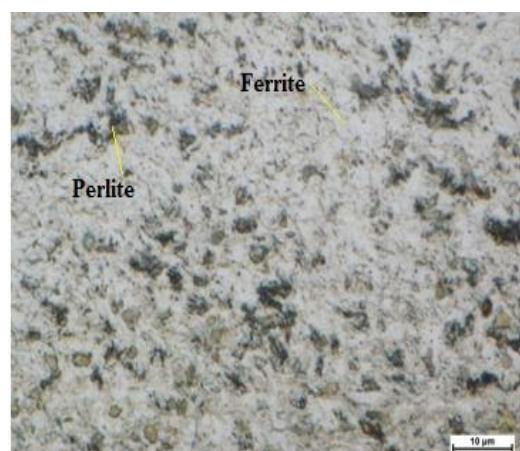


**Figure V.1 :** Macrographie de la soudure

#### V.1.1.3. Microstructure

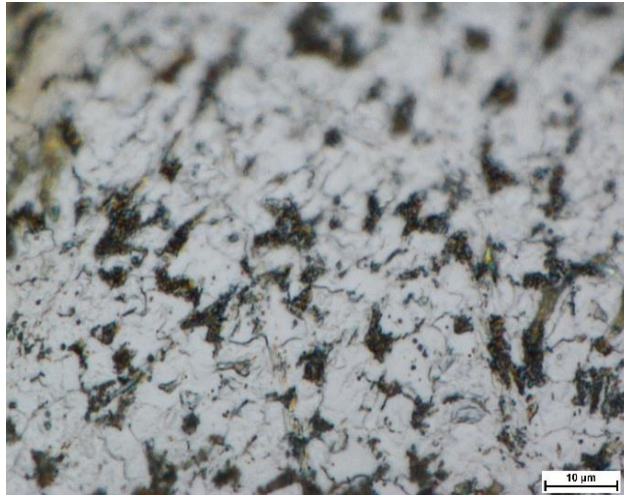
##### ❖ Micrographie du métal de base

La figure V.2 : montre une microstructure typique des aciers à haute limite élastique, c'est une structure qui n'a pas subi de transformation structurale lors de l'opération de soudage. Elle est constituée d'une structure ferritique (F) avec une proportion de grains perlitique qui est due à la présence du carbone.

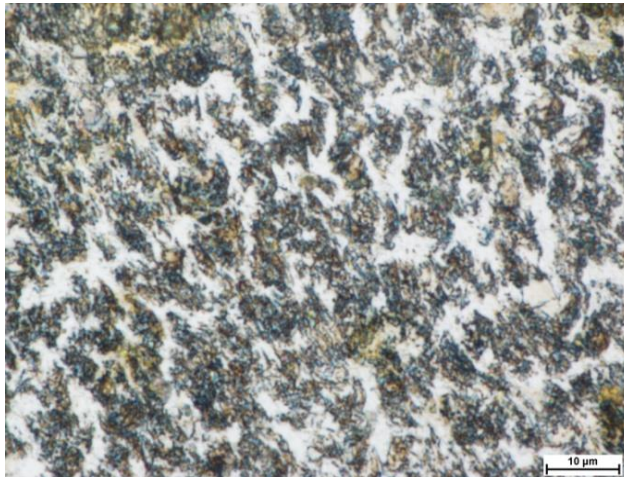


**Figure V.2:** Microstructure du métal de base

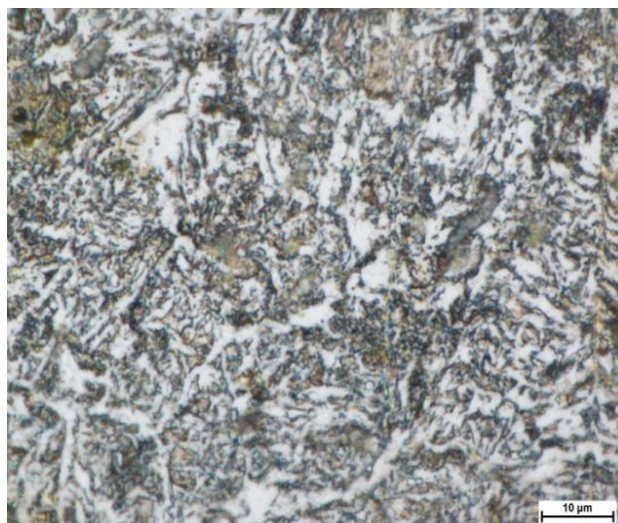
❖ Micrographie de la zone fondue (ZF)



**FigureV.3** : Microstructure de la zone fondue à la **racine** du cordon

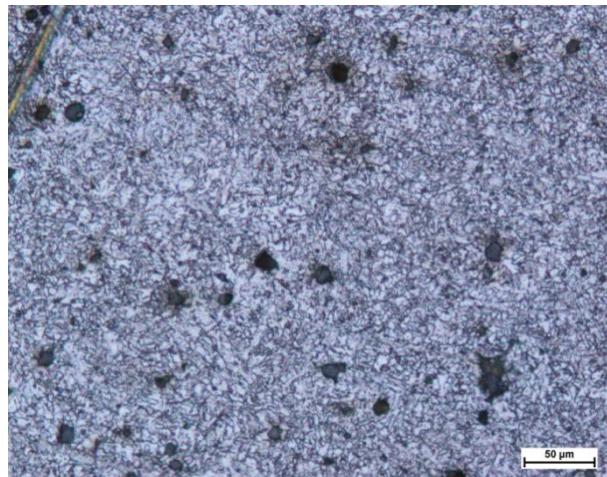


**Figure V.4** : Microstructure de la zone fondue au **milieu** du cordon



**FigureV.5** : Microstructure de la zone fondue à la zone de **finition** du cordon

## ❖ Micrographie de la Zone affectée thermiquement (ZAT)



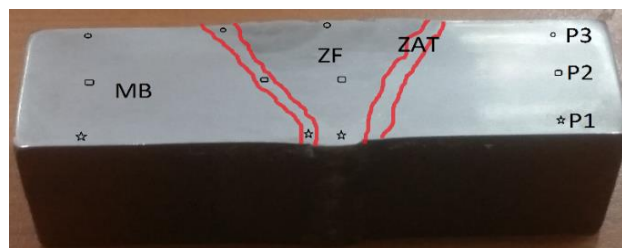
**FigureV.6 :** Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT)

En examinant les différentes structures présentes au niveau du cordon de soudure, à savoir celles de la zone fondue et celles de la zone affectée thermiquement, nous constatons que la structure est hétérogène. La zone fondue présente trois types de structure relatives à la racine, le milieu et la finition, cette dernière est une structure brute de solidification qui n'a pas été affectée par des passes ultérieures, tandis que la structure à la racine et au milieu du cordon ont été affectées par les passes qui ont suivi lors de l'opération de soudage par le phénomène du cumul des cycles thermiques. La zone affectée par la chaleur est caractérisée par une proportion élevée de ferrite avec un affinement de grain.

## V.2. Caractéristiques mécaniques :

### V.2.1. Essai de dureté :

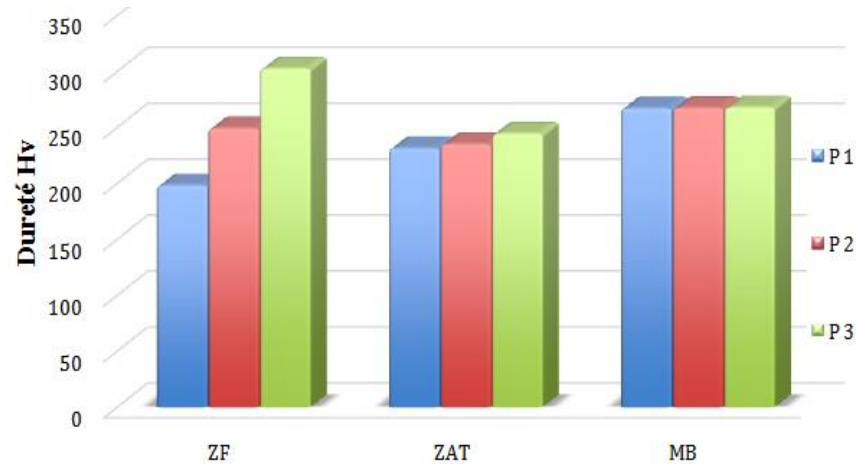
Le test de la dureté Vickers a été effectué pour les trois zones avec une charge appliquée de  $F=10\text{Kgf}$  sur la machine universelle de dureté INOVATEST NEMISIS 9000: le métal de base, la zone fondue et la zone affectée thermiquement. Trois mesures par zone ont été enregistrées, les moyennes calculées des différentes zones sont présentées par le tableau V.2.



**Figure V.7 :** Positions des mesures de dureté à travers le joint soudé.

**Tableau V.2 : Les valeurs moyennes de dureté (Hv)**

| Moyennes   | Métal fondu | ZAT   | Métal de base |
|------------|-------------|-------|---------------|
| Position 1 | 198.2       | 231.4 | 267.2         |
| Position 2 | 249.3       | 235.1 | 267.4         |
| Position 3 | 302.6       | 244.5 | 267.9         |
| Moyenne    | 250         | 237   | 267.5         |

**Figure V.8 : Histogramme de la dureté Vickers (Hv) par zone**

La figure V.8 est une représentation graphique de la moyenne des duretés mesurées à travers le joint de soudure au niveau des trois zones MB, ZAT et ZF

La ZAT avec le métal de base sont situés à des niveaux moyens par rapport aux valeurs extrêmes enregistrées dans la zone fondue. D'après cet histogramme, nous constatons que la Zone Fondue (ZF) présente une dureté croissante de la racine à la passe de la finition. Pour la ZF le minimum de dureté correspond à la racine et le maximum correspond aux passes de finition. Ce fait s'explique par le phénomène d'adoucissement engendré au niveau de la racine et le milieu du cordon par les cycles thermiques du soudage (effet du cumule des cycles thermiques mentionnés plus haut)

D'après les valeurs mesurées de dureté, on remarque que le métal de base est plus dur par rapport à la ZAT et le métal fondu au niveau de la racine, ceci en raison du fait qu'il y a plusieurs facteurs d'influence (facteurs de durcissement), durcissement par solution solide, durcissement par traitement thermomécanique... Nous mentionnons également que toutes les valeurs de dureté mesurées dans le métal fondu, la ZAT et le métal de base sont inférieures à la limite maximale (350 HV) exigée par la norme API pour l'acier API 5L X70.

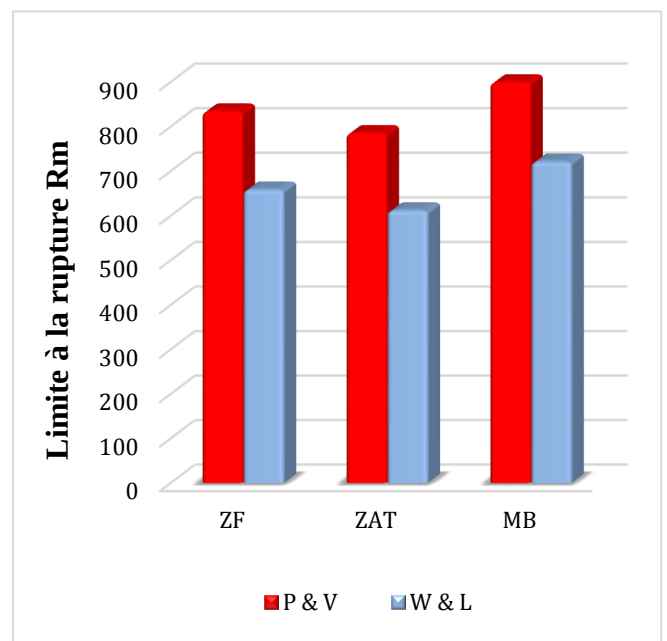
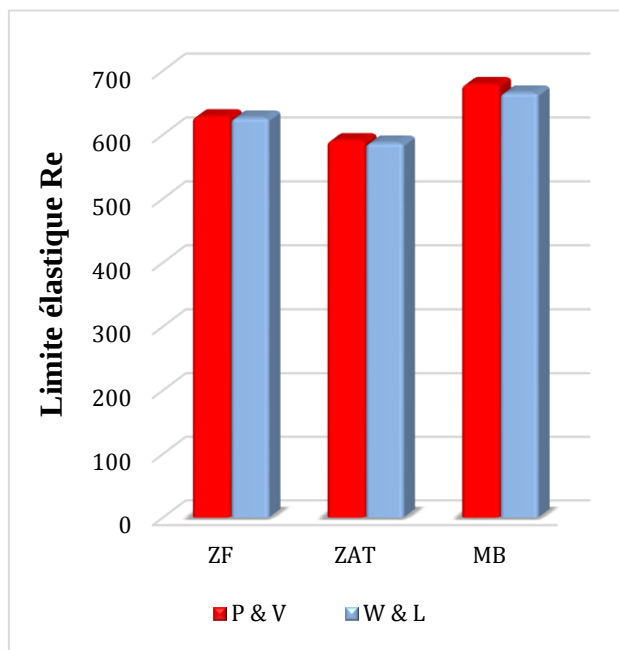
### V.2.1.1. Estimation des propriétés de traction à partir des essais de dureté

Comme les propriétés de dureté sont directement proportionnelles à celles de la traction, le gradient de dureté à travers la ZF et la zone affectée thermiquement est une forte indication à propos de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques de traction.

Le tableau ci-dessous montre les valeurs de la limite élastique et la résistance à la traction du MB, la ZAT et la ZF estimées à partir des mesures de dureté. La zone fondue toute seule présente trois niveau de propriétés de traction, les plus élevées correspondent à la finition et les plus faibles correspondent à la racine, la ZAT est située à des niveaux moyens. Concernant le métal de base il présente des valeurs importantes de propriétés de traction.

**Tableau V.3 :** Propriétés de traction à partir des mesures de dureté.

|      | Model : Pavlina et Van [44]                                                          |         |         | Model : Wei, Lu et al [44]                                                               |         |         |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|
|      | $\begin{cases} Re = 2,876 \cdot Hv - 90,7 \\ Rm = 3,734 \cdot Hv - 99,8 \end{cases}$ |         |         | $\begin{cases} Re = 3,013 \cdot Hv - 127,012 \\ Rm = 3,586 \cdot Hv - 237,9 \end{cases}$ |         |         |
| Zone | ZF                                                                                   | ZAT     | MB      | ZF                                                                                       | ZAT     | MB      |
| Hv   | 250                                                                                  | 237     | 267.5   | 250                                                                                      | 237     | 267.5   |
| Re   | 628,3                                                                                | 590,912 | 665,688 | 626,238                                                                                  | 587,069 | 665,407 |
| Rm   | 833,7                                                                                | 785,158 | 882,242 | 658,6                                                                                    | 611,982 | 705,218 |



**Figure V.9.a) :** Histogrammes des propriétés de traction (valeurs estimées à partir de la dureté)

**Tableau V.4 :** Propriétés de traction de la zone fondue **ZF** à partir des mesures de dureté.

|          | Model : Pavlina et Van [44]                                                          |          |           | Model : Wei, Lu et al [44]                                                               |          |          |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|
|          | $\begin{cases} Re = 2,876 \cdot Hv - 90,7 \\ Rm = 3,734 \cdot Hv - 99,8 \end{cases}$ |          |           | $\begin{cases} Re = 3,013 \cdot Hv - 127,012 \\ Rm = 3,586 \cdot Hv - 237,9 \end{cases}$ |          |          |
| Position | Racine                                                                               | Milieu   | Finition  | Racine                                                                                   | Milieu   | Finition |
| Hv       | 198.2                                                                                | 249.2    | 302.6     | 198.2                                                                                    | 249.2    | 302.6    |
| Re       | 479.3232                                                                             | 625.9992 | 779.5776  | 470.1646                                                                                 | 623.8276 | 784.7218 |
| Rm       | 640.8452                                                                             | 830.7128 | 1030.1084 | 472.8452                                                                                 | 655.7312 | 847.2236 |

**Figure V.9.b) :** Histogrammes des propriétés de traction de la zone fondue **ZF** (valeurs estimées à partir de la dureté)

### V.2.2. Essai de traction monotone:

Les essais de traction ont été effectués sur trois types d'éprouvettes, une éprouvette soudée avec une zone utile uniforme et deux autres éprouvettes soudées et entaillées avec une fissure de trois millimètres de profondeur (Eprouvettes SENT : Single Edge Notch Tension). Sur l'une des éprouvettes, l'entaille a été positionnée au milieu de la racine de la zone fondue, sur l'autre éprouvette l'entaille (fissure) a été réalisée au niveau de la ZAT du côté de la racine.

Les résultats des essais de traction ont été évalués selon deux méthodes. La première méthode est basée sur les données obtenues par le logiciel de la machine de traction, la deuxième méthode d'exploitation des essais de traction a été faite en se basant sur la

technique de la corrélation d'image numérique. Nous présentons tous d'abord les résultats de la machine et puis ceux de la corrélation d'image.

### V.2.2.1. Résultats données par la machine de traction :

#### a) Eprouvette soudée non entaillée.

La figure V.10 montre l'éprouvette de traction de la soudure sans entaille, c'est une géométrie sans rayon de courbure au niveau de la zone utile conformément à l'API 1104. Cette géométrie a été choisie pour qu'elle soit identique à celle des éprouvettes entaillées (éprouvettes SENT). Afin de pouvoir comparer les résultats des essais avec et sans entaille. Le tableau V.5 et les deux figures V.11 et V.12 présentent respectivement les résultats numériques et les courbes de traction conventionnelles et rationnelles obtenues.



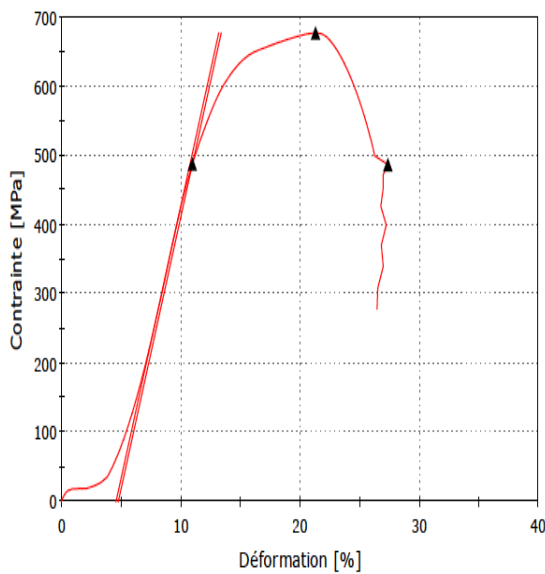
**Figure V.10 a) :** Epreuve soudée non entaillée



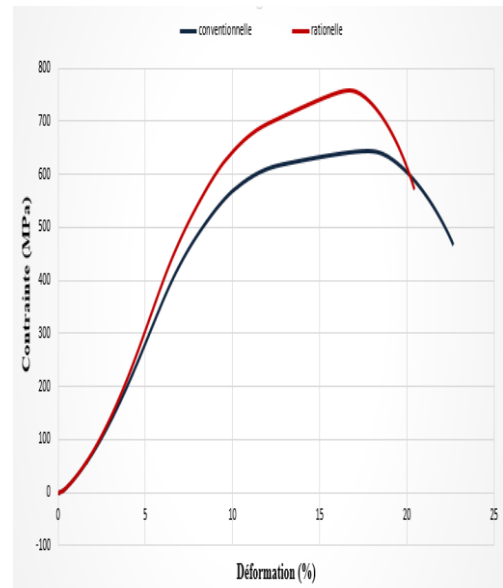
**Figure V.10 b) :** Epreuve non entaillée après la rupture

**Tableau V.5 :** Résultats données par la machine de traction (rationnelle)

| Largeur initiale<br>(mm) | Epaisseur initiale<br>(mm) | Re<br>(MPa) | Rm<br>(MPa) | déformation<br>(%) |
|--------------------------|----------------------------|-------------|-------------|--------------------|
| 19,50                    | 13,00                      | 600         | 760         | 21                 |



**Figure V.11:** Diagramme donné par la machine



**Figure V.12 :** Courbes de traction conventionnel/rationnel

Les valeurs de la limite élastique et la limite à la rupture (conventionnelles) ( $R_e = 500 \text{ MPa}$ ,  $R_m = 640 \text{ MPa}$ ) sont supérieures aux valeurs minimales préconisées par la norme API 5L ( $R_e = 483 \text{ MPa}$ ,  $R_m = 565 \text{ MPa}$ ).

La courbe de la figure V.12 a été tracée après enlèvement de la zone de glissement comprise entre ( $0 \leq \varepsilon \leq 4\%$ ) de la courbe obtenue par la machine de la traction (le glissement c'est un phénomène qui aura lieu lorsque la machine de traction exerce un effort sur l'éprouvette sans la déformer).

La limite élastique de la courbe rationnelle est supérieure à celle de la courbe conventionnelle car la surface soumise à l'effort ne reste pas constante ce qui engendre l'augmentation de la contrainte, par contre l'allongement de la courbe rationnelle est inférieure à celui de la courbe conventionnelle pour raison que la surface de l'éprouvette ne reste pas constante durant la phase de striction (elle diminue pendant l'expérience) ce qui provoque la diminution de l'allongement.

## b) Eprouvette soudée fissurée en zone fondue

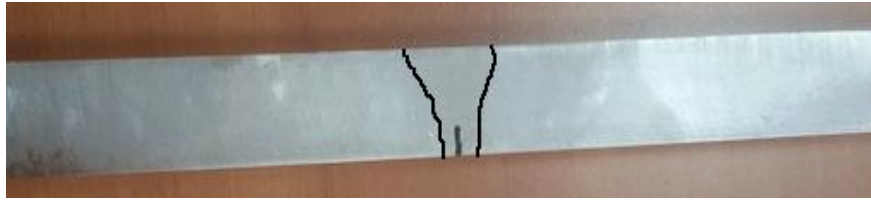


Figure V.13 a): Eprouvette entaillée dans la zone fondue

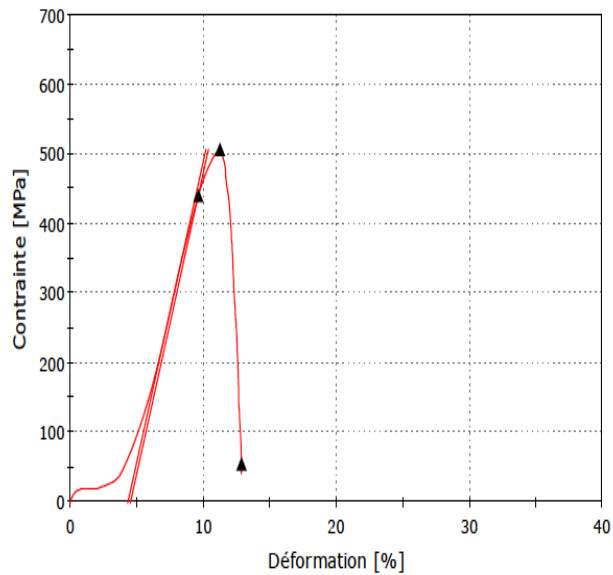


Figure V.13 b): Eprouvette entaillée en ZF après la rupture

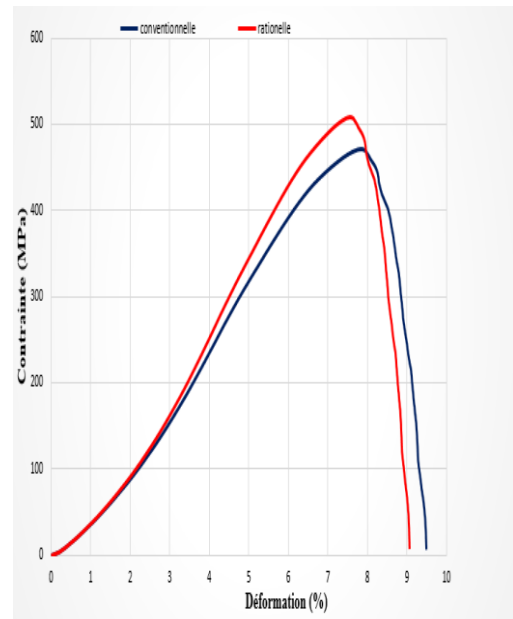
Les résultats de cet essai sont présentés par le tableau V.6 et les deux courbes de la figure V.15. La courbe de la traction de l'éprouvette fissurée en zone fondue nous montre que la rupture a lieu prématurément (à une contrainte = 500MPa). La présence de la fissure accélère la rupture de l'éprouvette qui a eu lieu après 7.8 % de déformation contrairement au cas de l'éprouvette non fissurée où la rupture s'est produite après environ 17% de déformation. Nous avons constaté également que la courbe est constituée principalement d'une phase élastique et une phase plastique uniforme, la phase correspondant à la striction n'est pas apparente. Dans ce cas la contrainte à rupture est équivalente à la résistance à la traction en présence de fissure.

Tableau V.6 : Résultats données par la machine de traction ZF (rationnel)

| Largeur<br>(mm) | Epaisseur<br>(mm) | Re (MPa) | Rm<br>(MPa) | déformation<br>(%) |
|-----------------|-------------------|----------|-------------|--------------------|
| 19,30           | 12,60             | 440,19   | 506,38      | 7.5                |



**Figure V.14:** Diagramme donné par la machine



**Figure V.15:** Courbes de traction rationnelle/conventionnelle

**c) Eprouvette soudée entaillée en zone affectée thermiquement.**

Cette éprouvette est montrée par la figure ci-dessous, la fissure a été effectuée après révélation des différentes zones du joint soudé par attaque chimique macrographique. Les résultats d'essai de cette éprouvette sont présentés par le tableau V.7 et les deux figures V.16.a) et V.16.b).



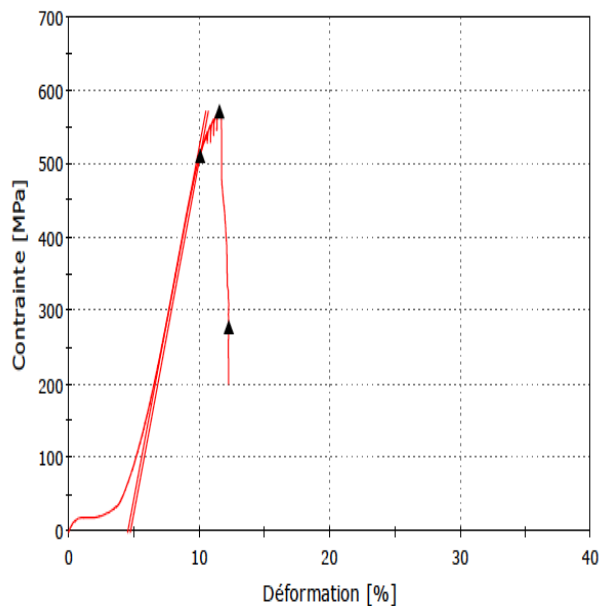
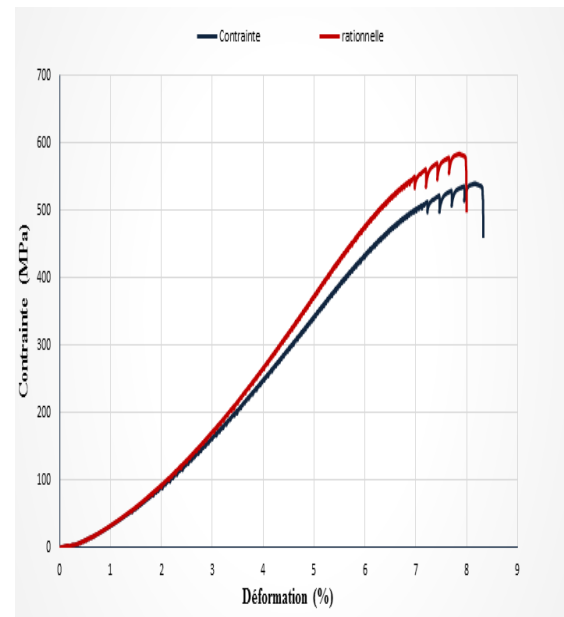
**Figure V.16.a) :** Eprouvette entaillée dans la ZAT



**Figure V.16.b) :** Eprouvette entaillée en ZAT après la rupture

**Tableau V.7 : Résultats données par la machine de traction ZAT**

| Largeur de l'éprouvette (mm) | Epaisseur (mm) | Re (MPa) | Rm (MPa) | déformation (%) |
|------------------------------|----------------|----------|----------|-----------------|
| 19,50                        | 12,50          | 511,19   | 571,29   | 8               |

**Figure V.17:** Diagramme donné par la machine**Figure V.18 :** Courbes de traction conventionnelle/rationnelle

Les mêmes constatations ont été observées que pour l'éprouvette entaillée en ZF. Avec une particularité d'une déformation plastique progressive caractérisée par des arrêts dans la phase plastique uniforme. La contrainte à la rupture pour cette éprouvette est supérieure de 80 MPa par rapport à celle fissurée en zone fondue.

Les arrêts observés (chutes brusques de contrainte) peuvent être expliqués par l'endommagement par palier, c.-à-d. l'avancement de la fissure par palier de contraintes. La zone affectée thermiquement avec sa structure fine favorise le blocage de l'avancement de la fissure, lorsque la contrainte augmente d'un certain niveau il y aura une rupture fragile localisée ce qui fait rechuter la contrainte et cela pour le même niveau de déformation, puis elle augmente encore une fois jusqu'à atteindre la limite à la rupture locale. Ces phénomènes se succèdent jusqu'à l'endommagement total de l'éprouvette.

### V.2.2.2. Résultats obtenus par corrélation d'images numériques :

#### V.2.2.2.1. Eprouvette soudée non fissurée :

Dans cette partie nous allons présenter les résultats des mesures de champs de déplacement et de déformation par corrélation d'image numérique en cours des essais de traction. Par cette méthode, nous allons présenter les vecteurs déplacements et les champs de déformation sous formes de cartographie. La partie de l'essai que nous allons traiter est la partie de plasticité uniforme et non uniforme. Pour cela, nous allons traiter la série d'image comprise entre la limite élastique ( $R_e = 600 \text{ Mpa}$ , image correspondante  $N^\circ = 260$ ) et la limite à la rupture ( $R_m = 760 \text{ MPa}$ , image correspondante  $N^\circ=350$ ), comme montré par la figure V.22.b

Comme l'extraction des images a été faite avec un pas de temps = 1 seconde, le fichier numéro d'images est équivalent au fichier temps donné par la machine de traction. De cette façon nous pouvons synchroniser la succession des images extraites de la vidéo et la courbe de traction obtenue par la machine.

#### ❖ Etude du comportement plastique uniforme :

##### • Vecteurs de déplacement :

La figure ci-dessous montre l'évolution des vecteurs de déplacement en cours de l'essai de traction entre la limite élastique et la limite à la rupture. On constate que le champ du déplacement longitudinal évolue continuellement durant l'essai jusqu'à l'apparition du début de la striction du côté de la racine.

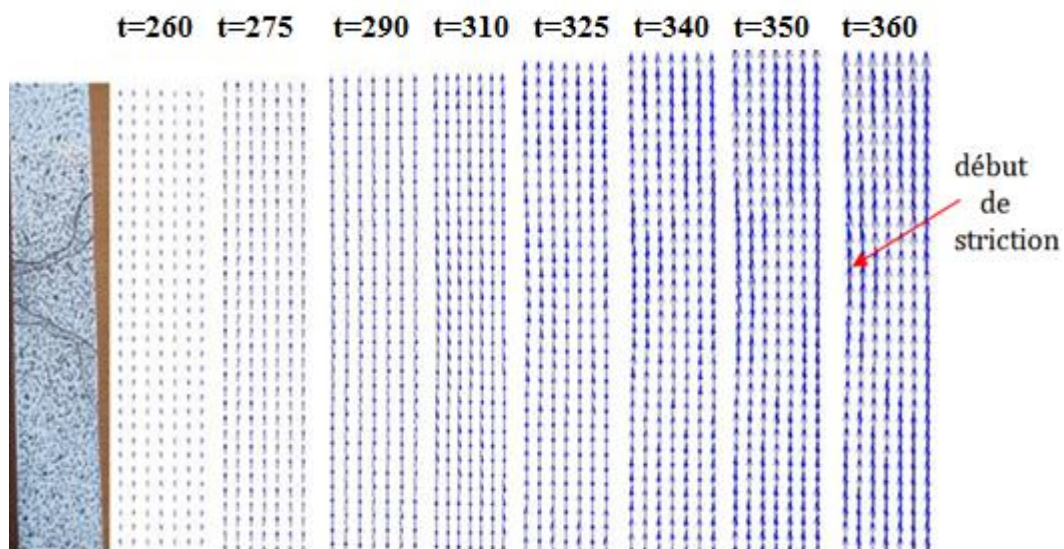
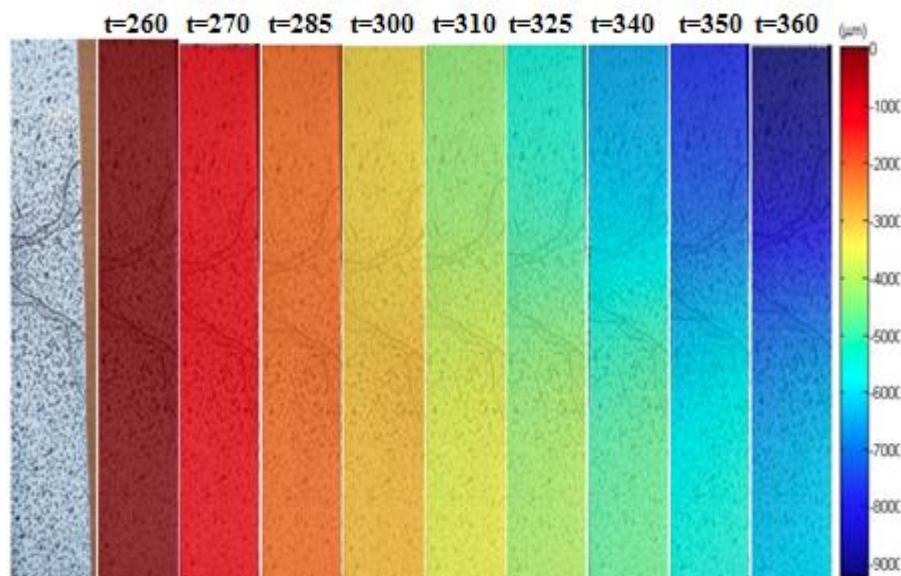


Figure V.19 : Evolution des vecteurs de déplacement

- **Cartographies de déplacement longitudinal:**

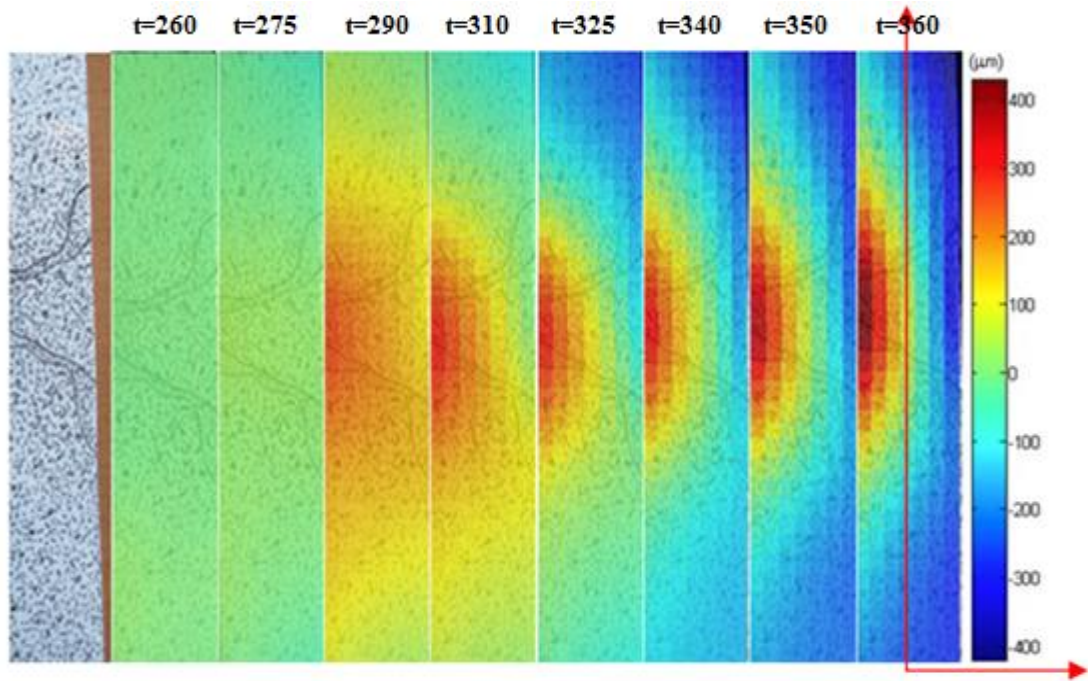
La figure (V.20) présente les cartographies du déplacement dans sens vertical (sens longitudinal de l'éprouvette). Nous remarquons à partir de cette représentation cartographique, que le champ du déplacement se concentre vers le haut de l'éprouvette au fur et à mesure. C'est dû au cumule des gradients de déplacement au niveau de la zone utile à partir du point le plus bas de l'éprouvettes jusqu'à l'extrémité haute (limites de la zone utile étudiée), qui est montré par la couleur bleu foncé. Le degré du déplacement apparait clairement sur l'échelle. Les valeurs sont avec un signe moins (-) sur l'échelle, c'est due à la méthode de calcul des déplacements par le logiciel qui considère que le déplacement est positive lorsque qu'il est orienté vers le bas, comme dans notre cas la traverse mobile de la machine de traction est celle qui est en haut, les valeurs apparaissent avec un signe négative. Durant cette partie plastique uniforme le déplacement maximal a atteint les 9000  $\mu\text{m}$  (9mm).



**Figure V.20 :** Représentation des cartographies de déplacement longitudinale (V)

- **Cartographies de déplacement transversal:**

La figure V.21 montre la représentation cartographique des déplacements dans le sens horizontal (U), c.-à-d. le sens transversal de l'éprouvette.



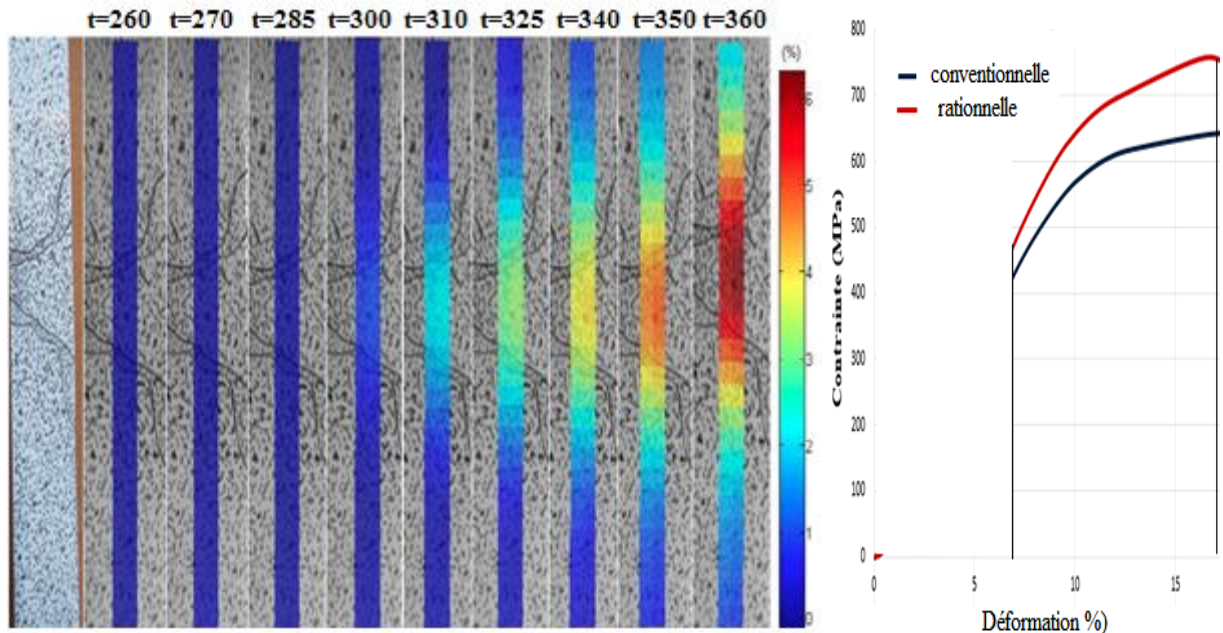
**Figure V.21 :** Représentation des cartographies déplacements transversal (U)

Ces cartographies montrent un niveau de déplacement très faible par rapport au déplacement longitudinal de l'éprouvette. La répartition des couleurs de l'échelle montrent que le champ de déplacement est concentré au niveau de la zone fondue. Comme l'axe vertical est situé au milieu de l'éprouvette, avec l'augmentation de la contrainte appliquée un amincissement apparaît au niveau des deux côtés droit et gauche de la zone fondue, et ces deux cotés tendent d'après l'échelle vers les plus grandes valeurs positives et négatives respectivement 400  $\mu\text{m}$ .

- **Cartographies de déformation longitudinale:**

La figure V.22 montre les cartographies de déformation selon le profil longitudinal (yy). Ces cartographies font apparaître une concentration continue du champ de déformation au niveau de la zone fondue en se rapprochant de la limite à la rupture de l'éprouvette. Nous constatons que tout au début de la partie déformation plastique uniforme, la répartition du champ de déformation est homogène et au fur et à mesure que la charge appliquée augmente (la contrainte augmente) la déformation se concentre au niveau de la zone fondue. On peut expliquer cela en revenant aux valeurs de dureté Vickers montrées par l'histogramme dans la section précédente qui indique qu'au niveau de la zone fondue les premières passes ont des duretés plus faibles, par conséquent leurs propriétés de traction doivent être les plus faibles, ce qui provoque un champ concentré dans cette zone par rapport aux autres zones.

La valeur de la déformation atteinte juste avant la striction correspondante à la partie plastique uniforme est de 13 % (figure V.24). Cette valeur est proche de celle donnée par la machine de traction montrée par la figure V.22. b) qui est de 17 %. Cette dernière valeur est inférieure à celle donnée par mesure de champ pour la zone fondue parce que la machine donne une valeur moyenne qui englobe l'effet des zones affectées et les matériaux de base.

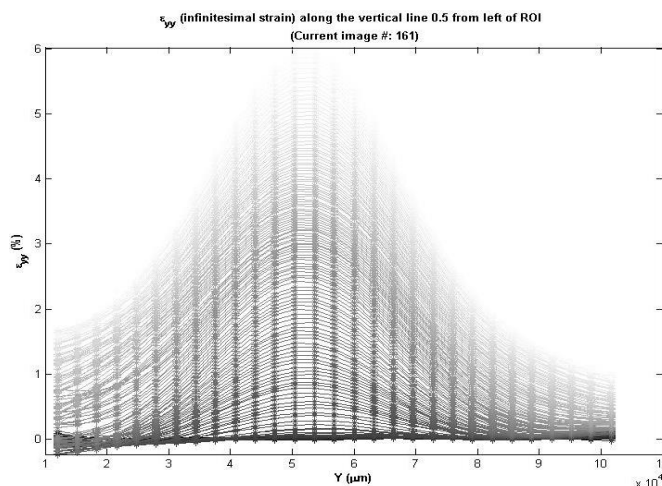


incluent dans la zone utile.

**Figure V.22.a) :** Cartographies de déformation longitudinale

**Figure V.22.b)** Partie plastique uniforme

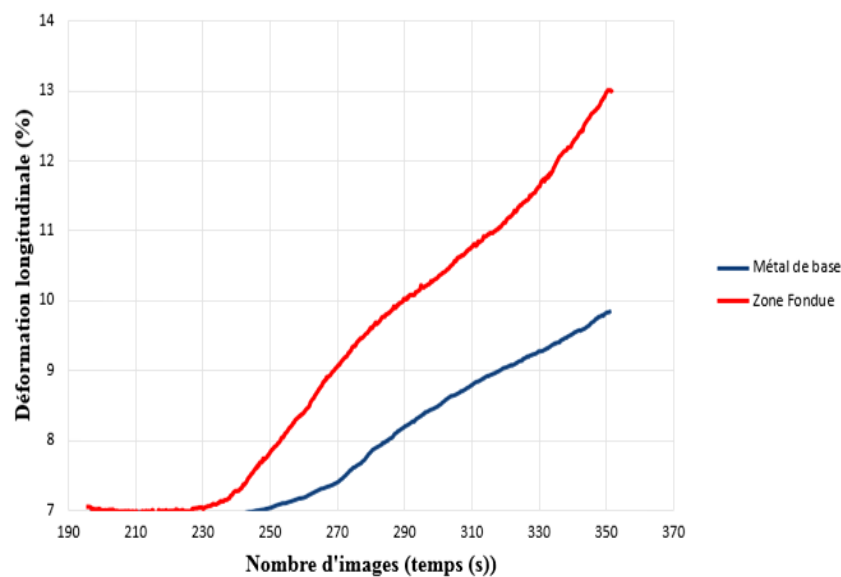
La figure ci-dessous illustre l'évolution de la déformation longitudinale le long d'une section verticale de l'éprouvette située au milieu. Cette section traverse toute la zone utile, les courbes représentent les niveaux instantanés de déformation et nous remarquons bien l'accélération de la déformation au niveau de la zone fondue.



**Figure V.23 :** Courbes de déformation  $\epsilon_{yy}$

- **Les déformations locales au niveau du métal de base et la zone fondue**

Cette figure V.24 montre l'évolution de la déformation longitudinale (%) en fonction du temps(s) ou bien en fonction du numéro des images (car l'extraction a été faite avec une fréquence d'une image par seconde). Pour pouvoir comparer les parties plastiques uniformes obtenues par les deux méthodes, nous allons positionner le début de la plasticité au même niveau de déformation (7% d'après la courbe de la figure V.22.b). Les déformations longitudinales des deux parties : zone fondue et le métal de base, se développent simultanément dans l'intervalle de temps (190s-230s), une fois qu'on arrive à l'instant 230s, le décalage progressif entre les deux courbes commence. La courbe relative à la zone fondue devient plus accélérée que celle du métal de base. Ce décalage est dû à la différence des caractéristiques mécaniques locales entre les deux zones (une dureté plus élevée pour le métal de base par rapport celle de zone fondue ce qui engendre une déformation moins importante, (10% pour le métal de base et presque 13% pour la zone fondue).



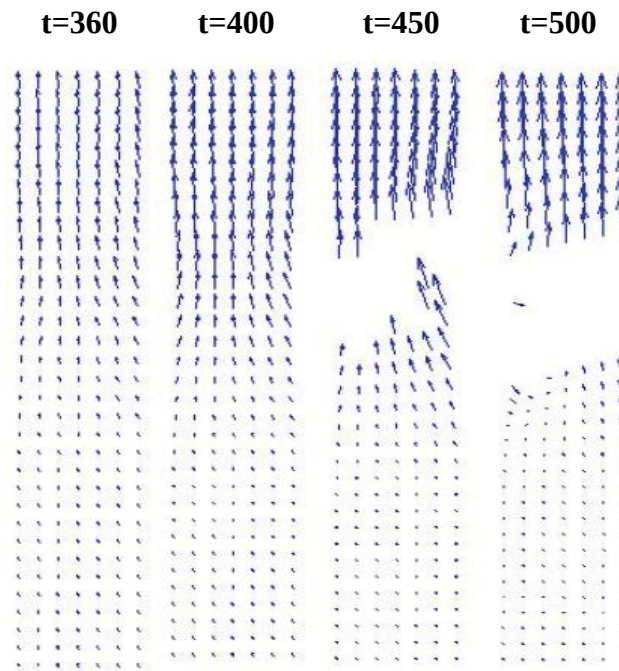
**Figure V.24 :** Déformation longitudinale locale de la zone fondue et le métal de base

❖ **Etude de l'évolution de la striction de l'éprouvette soudée**

- **Vecteurs de déplacement**

La figure V.25 représente l'évolution des vecteurs déplacements le long de la zone utile de l'éprouvette. Cette fois-ci on est en train d'étudier le comportement de l'éprouvette à partir de la limite maximale de la contrainte (résistance à la traction) jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette c.-à-d. le domaine de déformation plastique non uniforme ou domaine de

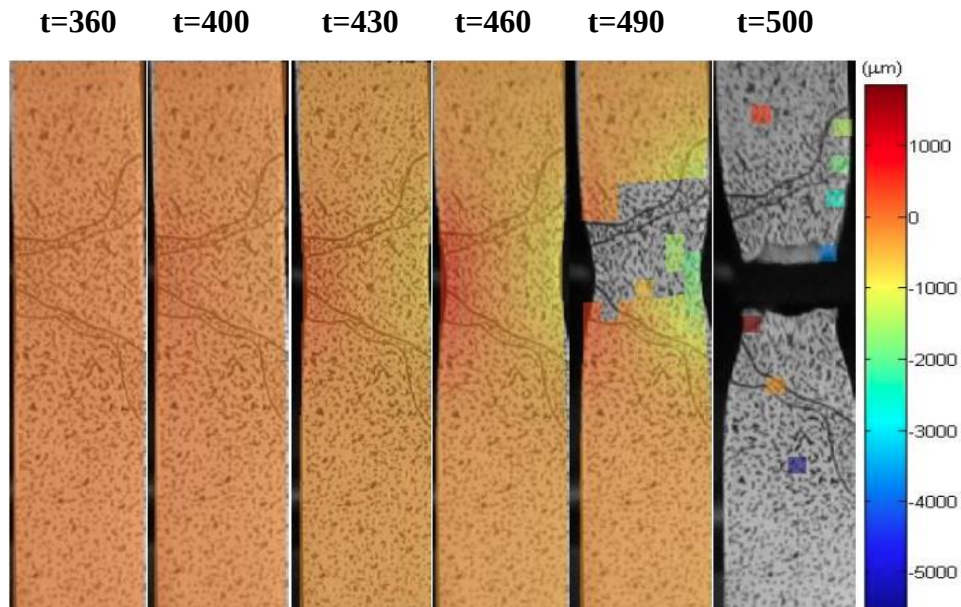
striction. La différence entre la partie inférieure de l'éprouvette et la partie haute qui est maintenue par la traverse mobile est claire.



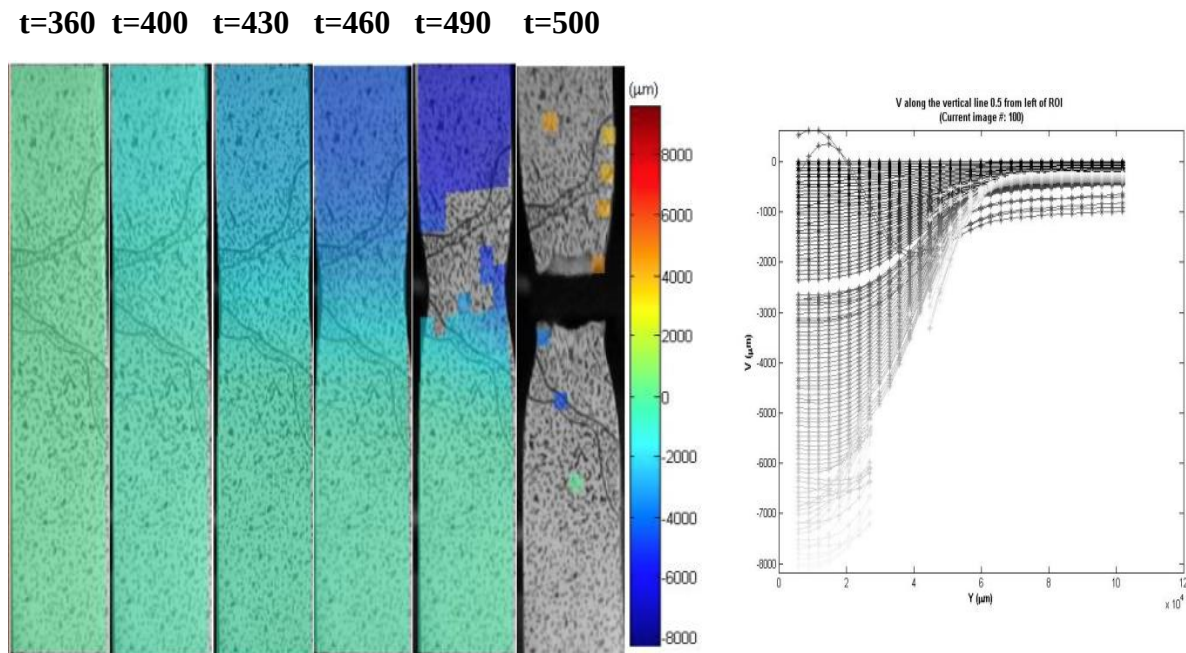
**Figure V.25 :** Vecteurs de déplacement à travers l'éprouvette pendant la striction.

- **Cartographies de déplacement**

Les figures V.27 et 27 représente respectivement les cartographies de déplacement transversal (U) et longitudinal (V). La première fait bien apparaitre l'évolution du champ du déplacement selon le profil horizontal, selon l'échelle, le taux déplacement ne dépasse pas la valeur de  $1000\ \mu\text{m}$  ( $1\ \text{mm}$ ) jusqu'à ce qu'on atteigne la rupture totale. Pour la seconde, le déplacement longitudinale augmente considérablement, d'après l'échelle on constate qu'il atteint des valeurs de l'ordre de  $-2000\ \mu\text{m}$  dans la partie basse, et  $-6000\ \mu\text{m}$  à  $-8000\ \mu\text{m}$  dans la partie haute de l'éprouvette. Nous rappelons que le signe moins (-) désigne le sens de déplacement de la traverse mobile qui est vers le haut. Comme constatation, l'influence de l'effort de traction selon le sens longitudinal est plus importante par rapport au sens transversal. A partir de la figure V. 28, nous observons bien l'évolution du champ de déplacement dans sens longitudinal.



**Figure V.26 :** Cartographies de déplacement transversal.



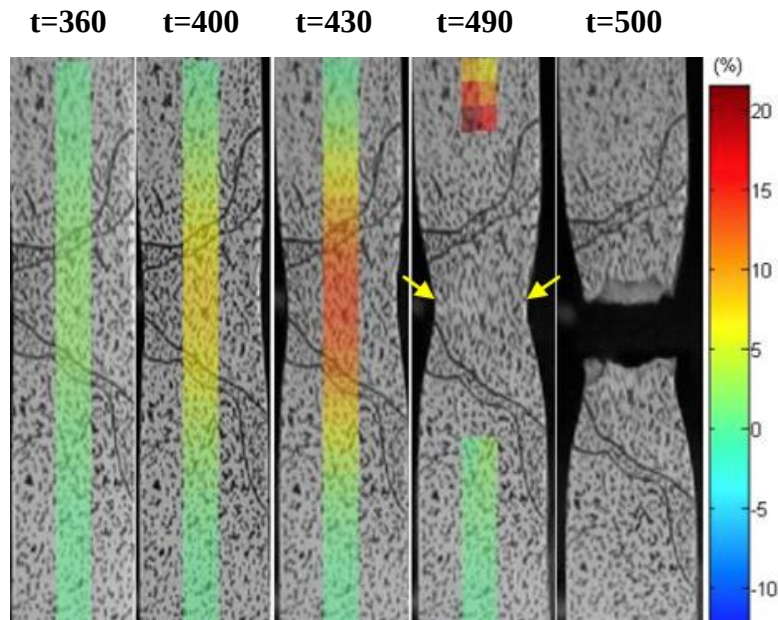
**Figure V.27:** Cartographies de déplacement longitudinal

**Figure V.28:** Courbes de déplacement longitudinal

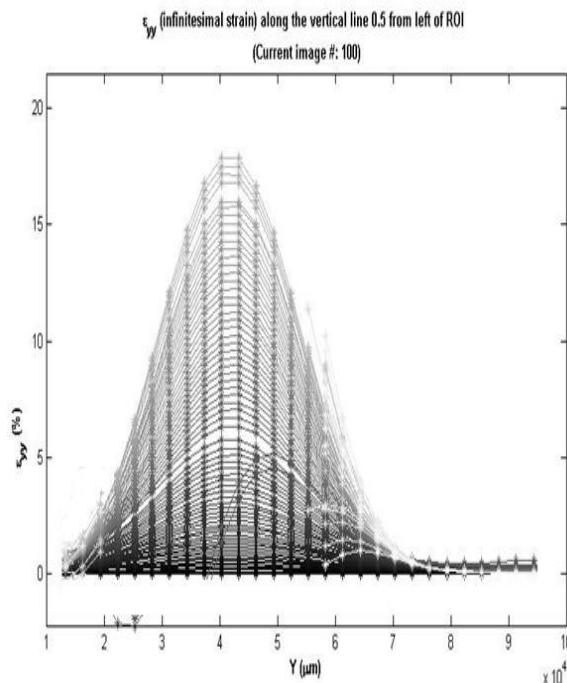
- **Cartographie et courbes de déformation longitudinale:**

La figure V.29 présente une série de cartographies de déformation verticale ( $\epsilon_y$ ) dans le domaine de la striction. En zone fondue la déformation locale atteint un taux de déformation de 20 % et pour le métal de base elle reste à un niveau très bas relativement. Les figures ci-dessous donnent l'évolution du champ de déformation ( $\epsilon_y$ ) et leurs courbes correspondantes selon la verticale le long d'un profil situé au milieu de l'éprouvette étudiée. La striction est

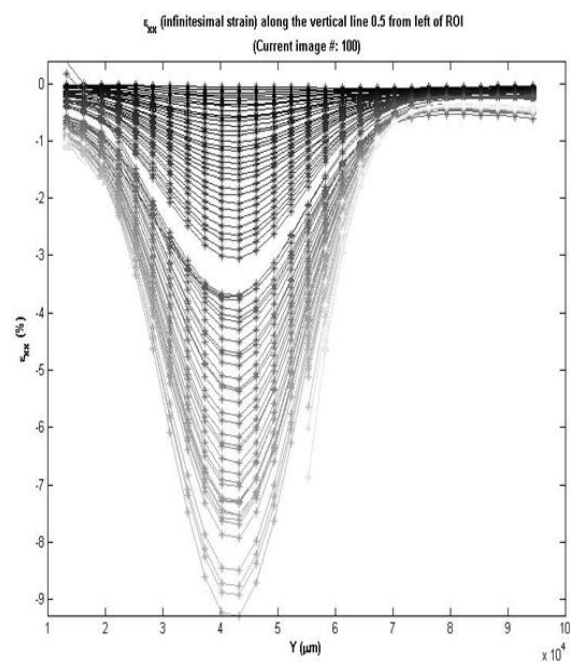
un phénomène qui accompagner par un relâchement de contrainte, dès son apparition toute la déformation est accumulé à cet endroit, dans notre cas c'est la zone fondue, les autres régions (métal de base principalement) en générale conserve les mêmes niveaux de déformation. Cet effet est bien apparent par le comportement du métal de base qui reste au même niveau d'après les courbes de la figure V.31



**Figure V.29 :** Cartographies de déformation longitudinale  $\epsilon_{yy}$  le long de la zone utile



**FigureV.30:** Courbes déformation longitudinale  $\epsilon_{yy}$



**FigureV.31:** Courbes déformation transversale  $\epsilon_{xx}$

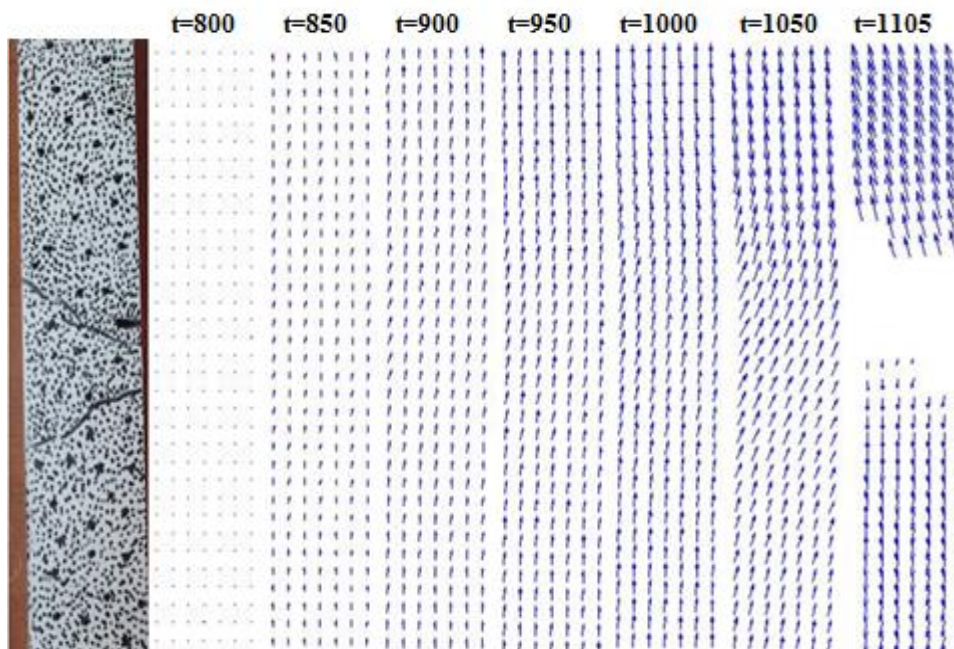
#### V.2.2.2.2. Eprouvette soudée entaillée en ZAT

Dans cette partie nous allons présenter les résultats des mesures de champs de déplacement et de déformation par corrélation d'image numérique au cours de l'essai de traction sur l'éprouvette soudée entaillée en zone affectée thermiquement du côté de la racine. Par cette méthode, nous allons présenter les vecteurs déplacements et les champs de déformation sous formes de cartographie. La partie de l'essai que nous allons traiter est la partie de plasticité jusqu'à la rupture de l'éprouvette, afin de suivre la propagation de fissure dans le joint soudé

Comme l'extraction des images a été faite avec un pas de temps = 1 seconde, le fichier numéro d'images est équivalent au fichier temps donné par la machine de traction (de 800s à 1105s). De cette façon nous pouvons synchroniser la succession des images extraites de la vidéo et la courbe de traction obtenue par la machine.

- **Vecteurs de déplacement**

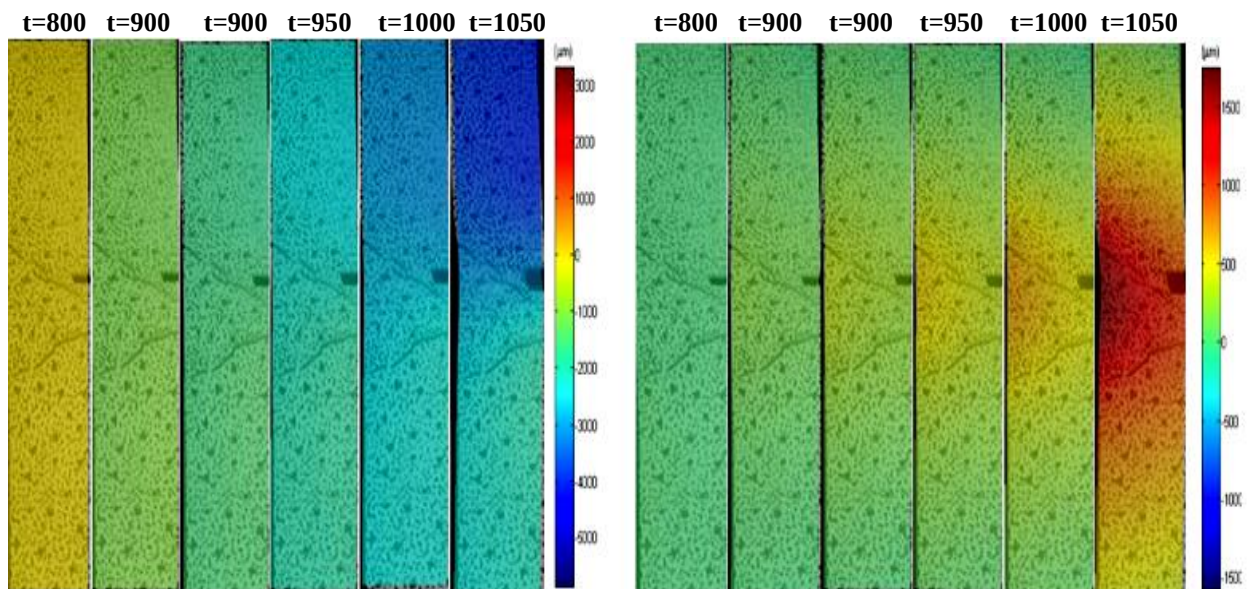
La figure ci-dessous montre l'évolution des vecteurs des déplacements le long de l'éprouvette, cette fois ci nous allons étudier le comportement de l'éprouvette soudée entaillée au niveau de la zone affectée thermiquement. Cette représentation fait apparaître l'orientation vers la fissure dès qu'on arrive à la limite à la rupture (début de la striction).



**Figure V.32 : Vecteurs déplacement**

- **Cartographies de déplacement**

Les figures V.33 et V.34 représentent respectivement les cartographies de déplacement vertical et horizontal le long de la zone d'intérêt pour l'éprouvette entaillée en ZAT. Comme l'essai de traction est unidirectionnel, pour les déplacements verticaux le cumule se fait dans le sens de la traverse mobile (partie haute de l'éprouvette), mais du fait de la tri-axialité de la contrainte dans le volume de l'éprouvette il se produit rapidement un effet de rétrécissement à l'endroit où est située l'entaille (fissure). Dans le sens horizontal la striction se produit de part et d'autre de la largeur au niveau de la zone fondue et la ZAT entaillée. Les valeurs du déplacement dans le sens longitudinal sont plus importantes par rapport au sens transversal, ils sont en valeur absolue de l'ordre de 5 mm et 1,5 mm respectivement.



**Figure V.33:** Cartographies déplacements V    **Figure V.34:** Cartographies déplacements U

- **Cartographies déformation**

La figure ci-dessous présente une série de cartographies de déformation longitudinale ( $\epsilon_y$ ) dans le domaine plastique uniforme, d'après la courbe de traction relative à cet essai, l'éprouvette n'a pas présenté une striction progressive à cause de l'entaille. Pour la zone fondue, la déformation locale a atteint une valeur de déformation de 8 %, et pour le métal de base elle est restée à un niveau très bas relativement. La figure V.36 donne l'évolution du champ de déformation ( $\epsilon_y$ ) selon un profil vertical au milieu de l'éprouvette.

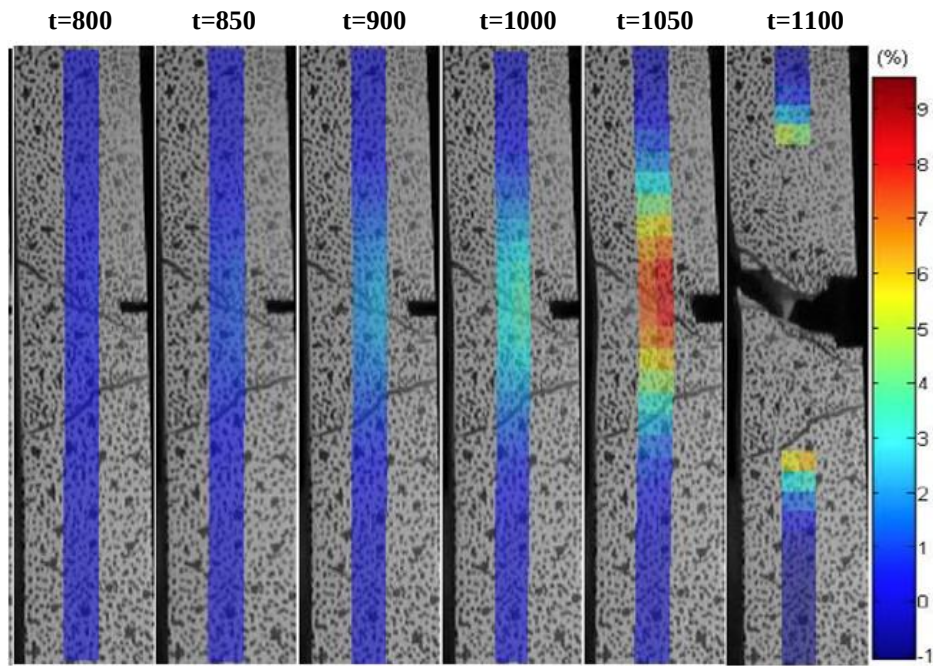


Figure V.35 : Cartographies de déformation longitudinale

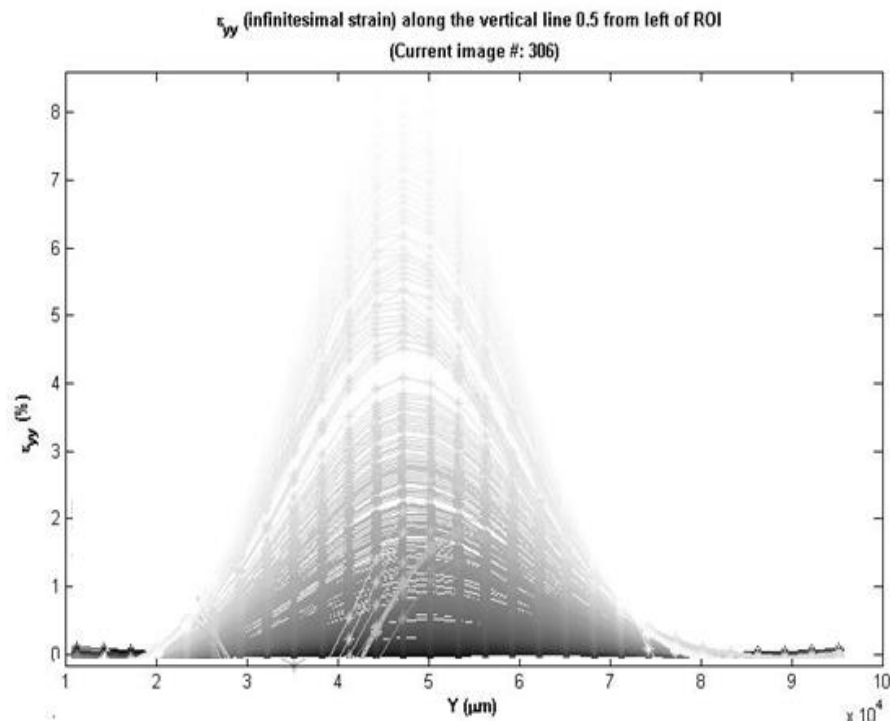


Figure V.36 : Courbes de déformation longitudinale

# **Conclusion générale et perspectives :**

## **Conclusion générale et perspectives**

Au cours de cette étude nous avons déterminé les caractéristiques d'une soudure de pipeline (API X 70), sur le plan structural et mécanique. Malgré l'hétérogénéité que présente cette soudure elle reste conforme aux exigences des conditions de service. L'introduction de l'effet d'entaille en zone affectée thermiquement a révélé que la propagation de la fissure évolue progressivement d'une manière étagée, c.-à-d. par paliers de niveaux de contraintes, et d'après nos résultats la fissure poursuit un chemin préférentiel confiné dans le domaine de la zone affectée par la chaleur.

Cette étude a été enrichie par l'introduction de la nouvelle technique de caractérisation basée sur la mesure des champs de déplacements et de déformations par corrélation d'image numérique. D'après les résultats, cette technique est très puissante en terme de quantité de données qu'elle peut fournir lors d'un seul essai. Nous avons pu voir l'évolution des champs de déplacements et de déformations en temps réel. Pour l'éprouvette testée, nous avons pu également observer la concentration de la déformation locale au niveau des zones les moins rigides.

Enfin il a été possible grâce à cette technique de faire une comparaison entre les différentes techniques de caractérisation utilisées et d'expliquer l'influence de l'hétérogénéité locale des propriétés de la soudure sur le comportement globale.

## Références bibliographiques :

- [1] A. S. BILAT. Estimation du risque de rupture fragile de soudure de pipelines en aciers à haut grade: caractérisation et modélisation, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (Juin 2007).
- [2] A. Pineau (2009) "Intégrité mécanique des pipelines et gazoducs: enjeux scientifiques et techniques". Séminaire International sur les Technologies Mécaniques : SITEM 09, Tlemcen 05 et 06 Décembre 2009.
- [3] <http://www.universalis.fr/encyclopedie/petrole-le-transport/7-le-transport-du-petrole-parpipeline/>
- [4] F Aggoune (2010), thèse de magister, " Evaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation." Université MENTOURI Constantine, Algérie 2010
- [5] Effect of forming and calibration operations on the final shape of large diameter welded tubes G. Palumbo \*, L. Tricarico Materials Processing Technology, 2005
- [6] Metals handbook Vol.1 «Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys», ASM International, USA, 2005.
- [7] Marc GRUMBACH, Technique de l'ingénieur, «Aciers micro-alliés», M4 525.
- [8] Specification for line pipe, Forty-Fourth Edition, ISO 3138, October 2007
- [9] T. Gladman, D. Dulieu and I.D. McIvor, Ed., Micro-alloying 76, Proceedings of the Conference, New York, 1976, (Union Carbide Corp., New York, 1976), pp.32
- [10] Marc GRUMBACH, « Aciers d'usage général - Calcul des caractéristiques mécaniques », Techniques de l'ingénieur, M307, Traité de Métallurgie, 1991, pp.1-4
- [11] J. Majta, J.G. Lenard, M. Pietrzyk, "A study of the effect of the thermo-mechanical history on the mechanical properties of a high niobium steel", Materials Science and Engineering: A, Vol. 208, 1996, pp. 249-259
- [12] A. S. Keh, "Work hardening and deformation sub-structure in iron single crystals deformed in tension at 298°k", Philosophical Magazine, Vol. 12, 1965, pp. 09-30
- [13] M. Neale, M. Gee, "A Guide to Wear Problems and Testing for Industry", chapter 2: industrial wear problems, ISBN-9780815514718, 1st edition 2001,
- [14] S. Mohan, Ved. Prakash, J. P. Pathak, "Wear characteristics of HSLA steel", Wear, Volume 252, Issues 1-2, 2002, pp. 16-25
- [15] A. K. Padap, G. P. Chaudhari , S. K. Nath, "Dry Sliding Wear and Corrosion Behavior of Ultrafine grained HSLA Steel Processed using Multi Axial Forging ",Supplemental

Proceedings, Volume 2 : Materials Fabrication, Properties, Characterization, and Modeling, TMS (The Minerals, Metals & Materials

[16] S. Narkhede, P. Bhoyar, S. Dhone, R.K. Khatirkar & S.G. Sapate, "Effect of Inter Critical Annealing on Microstructure and Wear Behaviour of En-8 Steel", International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering, Volume-1, Issue-1, 2012, pp. 113-116

[17] M. Aksoy, M.B. Karamq, E. Evin, An evaluation of the wear behaviour of a dual-phase low carbon steel, Wear 193 (1996) 248-252.

## **Chapitre 02**

[18] Perry, N. (2000). " Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables", thèse Ecole Centrales de Nantes.

[19] Rosenthal, D. (1941). "Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting». Welding Journal, V.20 (N°5), pp 220 - 234.

[20] Pavelic, V., Tanbakuchi, R., Uyehara, O. A., & Myers, P. S. (1969). "Experimental and Computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates", Welding Research Supplement, Vol. 48, pp. 295-305.

[21] Friedman, E., & Glickstein, S. S. (1976). "An investigation of thermal response of stationary gas tungsten arc welds". Welding Journal, Vol. 55, pp.408-420.

[22] Eagar, T. W., & Tsai, N. S. J. (1983). "Temperature fields produced by travelling distributed heat sources ". Welding Journal, Vol.62 (n.12), and pp.346 - 355.

[23] Jeong, S. K., & Cho, H. S. J. (1997). "Analytical solution to predict the transient temperature distribution in fillet arc welding". Welding Journal, Vol.76 (n.6), pp.223-232.

[24] Goldak, J., & Gu, M. (1995). "Computational weld mechanics of the steady state". The Institute of Materials: in H. Cerjak (Ed.).

[25] Fang, H., Meng, Q., Xu, W., & Ji, S. (2005). "New general double ellipsoid heat source model". Science and Technology of Welding & Joining, Vol.10 (N.3), pp. 361-368.

[26] Hamide, M. (juillet 2008). "Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers ". Thèse de l'Ecole supérieure des mines de Paris, France

[27] Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). "Friction stir welding and processing", Material Science and Engineering, R50, pp.1-78.

[28] Lancaster, J. F. (1984.). "The Physics of Welding". Physics in Technology, Vol.15 (Issue 2), pp.73-79.

[29] R.Cazes. Soudage à l'arc. Techniques de l'ingénieur, B7730, Août 1995.

- [30] B. Chassignole, Thèse de doctorat, « Influence de la structure métallurgique des soudures en aciers inoxydables austénitiques sur le contrôle non destructif par ultrason ». Insa- Lyon. 2000
- [31] H. Granjon. « Bases métallurgiques de soudage ». 2<sup>ième</sup> édition. Publication du soudage et de ses applications. Paris. 1995.
- [32] Mathieu Touboul. Étude du comportement mécanique à chaud de l'acier P91 : vers la compréhension du rôle des mécanismes intra/intergranulaires sur la tenue en fluage. Application aux structures soudées. Thèse de doctorat. Ecole Doctorale Sciences des Métiers de l'Ingénieur - SMI (Paris). 2012.
- [33] Y. KCHAOU, Thèse de doctorat, « Etude comparative de la tenue mécanique des joints soudés des réservoirs sous pression de deux aciers inoxydables super austénitique et duplex », Poitiers, 2015.
- [34] Cours de soudage et contrôles non destructif, MENAD, UMBB/FHC, 2015
- [35] site soudeur : <http://www.soudeurs.com/>
- [36] cazes Roland. Soudage à l'arc. Technique de l'ingénieur, B7730.
- [37] Barralis.J, Maeder. G. précis de métallurgie. Edition NATHAN ,1995
- [38] Klas weman. Aide-mémoire (procédés de soudage). Édition DUNOD, 2003.
- [39] Vavisellaz. R. Soudage éléments de conception et de réalisation. Edition DUNOD, 1982
- [40] Patrick Isac Les procédés de soudage et de coupage, Compléments au précis de construction mécanique, Tome II, 2013.
- [41] Daigle, P. (2003a). "Le procédé de soudage TIG/GTAW/141", pp.1-7 Daigle, P. (2003b). "Le procédé TIG\_GTAW". Edition du Centre de formation professionnelle de l'Outaouais Québec, Canada, pp.1-51.

### **Chapitre 03**

- [42] Cours de comportement mécanique des matériaux, GACEB Mohammed UMBB/FHC, 2015
- [43] FORTUNIER Roland. Comportement Mécanique des Matériaux. Ecole Nationale Supérieure des Mines, France.
- [44] Martin H, Sadd .Elasticity Theory, Application, and Numeric. Edition Elsevier Butterworth Heinemann, 2005.
- [45] Samuel Forest, Michel Amestoy, Sbine Cantournet, Gilles Damamme, Serge Kruch. MECANIQUE DES MILIEUX CONTINUS. Ecole des mines de paris, 2006.
- [46] Jean Philippe Château, Jean Pierre Michel, Tomas Kruml. Contraintes, petites déformation, élasticité. Ecole des mines de NANCY, 2006, France

- [47] R. Fortunier. Mécanique des milieux continus. Cours ENSM-SE, 1998.
- [48] F. Hild, B. Raka, M. Baudequin, S. Roux, F. Cantelaube, « Multi-scale displacement field measurements of compressed mineral wool samples by digital image correlation », Appl. Optics IP, vol. 41, 2002, p. 6815-6828.
- [49] Gad-El-Hak M., The MEMS Handbook, CRC Press, 2002.
- [50] H.U. Hong, B.S. Rho, S.W. Nam. A study on the crack initiation and growth from  $\delta$  ferrite/ $\gamma$  phase interface under continuous fatigue and creep-fatigue conditions in type 304L stainless steels. International Journal of Fatigue, janvier 2002.
- [51] F.Amiot, F. Hild, J. P. Roger, Mesure de champ de déplacement micrométrique d'une surface par corrélation de sa topographie.
- [52] D.Mowbray. Thermal fatigue of materials and components, Spera 1976
- [53] Documentation for Matlab-based DIC code, E. M. C. Jones, University of Illinois, August 14, 2013