

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



**Département de Métallurgie**

Mémoire de master  
en vue de l'obtention du diplôme de master  
en Génie des Matériaux

*Thème*

Caractérisation multi échelle de deux aciers à haute limite  
élastique API X52 et API X60 soudés, utilisés dans  
l'industrie gazière.

**Promoteur : Pr M.E. DJEGHLAL**

**Réalisé par :**

**Proposé par : Mme H. HACHEMI**

**CHIKHI Koceila**

Promotion septembre 2014  
ENP, 10 Avenue HassenBadi – El Harrach, Alger  
[www.enp.edu.com](http://www.enp.edu.com)

## ملخص

تهدف هاته الدراسة الى تحديد الخواص الميكانيكية وقابلية التلحيم للفولاذ ذي المرونة العالية API X60 و API X52 . تحت تأثير عناصر الاضافة لصناعة السبائك من أجل المقارنة . هذه الدرجات يتم استخدامها في بناء أنابيب خطوط

الكلمات الرئيسية  
المجهرية، الصلب API X60, API X52, لحام كهربائي

## Résumé

Cette étude porte sur la détermination des propriétés mécaniques et de soudabilité des aciers à haute limite élastique API X52 et API X60 sous l'influence des éléments d'addition dans le but de les comparer, ces nuances sont utilisées dans la construction des gazoducs.

**Mots clefs :** acier API X52 et API X60, soudage à l'arc électrique, microstructure,

## Abstract

This study focuses on determining the mechanical properties and weldability of steels with high yield API X52 and API X60 under the influence of alloying elements in order to compare them, these grades are used in the construction of pipelines.

**Keywords:** API X52 and API X60 steel, microstructure, electric arc welding,

## Remerciement

Tout au long de ma travail jusqu'à la présentation finale, j'ai bénéficié de nombreux et divers appuis pour mener à bien ce travail. Un chaleureux remerciement à tous ceux qui m'ont permis d'aller au bout de l'aventure.

Mes remerciements vont à mon promoteur Pr DJEGHLAL et ma co-promotrice Mme HACHEMI qui ont encadré ce travail au quotidien. Leurs qualités tant scientifiques qu'humaines ont été pour moi un soutien inestimable

Je voudrais remercier Mr ABADLI, Mr SALHI et Mr KASSER d'avoir accepté de me faire honneur d'être parmi les jurys.

J'ai eu la chance au cours de cette étude de bénéficier l'appui technique d'autres laboratoires. Je tiens à remercier Mr BAOUALI responsable au laboratoire d'essai mécanique à ANABIB ainsi que tous le personnels de ANABIB pour leur aide très précieuse.

## Liste des figures

<i>Figure I.1 : Principe de soudage manuel.....</i>	3
<i>Figure I.2 : Principe de soudage automatique.....</i>	4
<i>Figure I.3 : principe de soudage sou flux gazeux.....</i>	4
<i>Figure I.4 : Schéma de la rupture fragile et de la rupture ductile.....</i>	7
<i>Figure I.5 : évolution de <math>T_{min}</math> en fonction de <math>e</math> et de <math>Tk_{28}</math> dans le cas de l'acier S355.....</i>	9
<i>Figure I.6 : Terminologie employée pour les soudures bout à bout.....</i>	9
<i>Figure II.1 : Organigramme de la production au sein de ALTUMET SPA.....</i>	11
<i>Figure II.2 : Cycles thermiques de soudage.....</i>	13
<i>Figure II.3 : Orientation des grains dans la ZF de l'acier X52 lors du refroidissement.....</i>	14
<i>Figure II.4 : description des différentes zones microstructurale d'une soudure.....</i>	15
<i>Figure II.5 : Défauts de soudage dans des cordons de soudure de l'acier X52 détectés par radiographie.....</i>	17
<i>Figure III.1 : évolution de la soudabilité en fonction du <math>C_{eq}</math>.....</i>	21
<i>Figure III.2 : Etat métallographique d'un cordon de soudure d'un acier X52.....</i>	22
<i>Figure III.3 : état métallographique d'un cordon de soudure d'un acier X60.....</i>	23
<i>Figure III.4: diagramme de Schaeffler-Delelong.....</i>	24
<i>Figure III.5 : Histogramme de la résistance mécanique du X52 et X60.....</i>	26
<i>Figure III.6 : Histogramme de la résistance mécanique du X52 et X60.....</i>	28

## Liste des tableaux

<i>Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques des aciers des tubes selon les l'API 5L.....</i>	5
<i>Tableau III.1 : composition chimique X52.....</i>	19
<i>Tableau III.2 : composition chimique pour le X60.....</i>	20
<i>Tableau III.3 : résultats de l'essai de résilience pour le X52.....</i>	25
<i>Tableau III.4 : résultats de l'essai de résilience pour le X60.....</i>	26
<i>Tableau III.5 : Essai de traction X52 non soudé.....</i>	27
<i>Tableau III.6 : Essai de traction sur éprouvette X52 avec soudure.....</i>	27
<i>Tableau III.7 : Essai de traction X60non soudé.....</i>	28
<i>Tableau III.8 : Essai de traction sur éprouvette X60 avec soudure.....</i>	28

## Sommaire

Introduction.....	1
<hr/>	
<i>partie théorique</i>	2
<hr/>	
I. Contexte industriel du soudage des pipelines.....	2
I. 1. Importance économique de l'industrie des pipelines.....	2
I. 2. Procédés de fabrication par soudage.....	2
I.2.1.procéde manuelle.....	3
I. 2. 2. Procédés automatiques et semi automatiques.....	3
I.2.2.1. Soudage automatique sous flux solide en poudre.....	3
I.2.2.2. Soudage sous flux gazeux.....	4
I. 3. Importance des normes .....	5
I. 4. Critères de choix des nuances d'acier en vue du soudage.....	5
I. 5. Classes de nuances d'acier au carbone utilisées en tuberie .....	6
I. 6. Contraintes de services et phénomènes d'endommagement des pipelines.....	6
I.7. Méthodes d'étude de la soudabilité des aciers.....	7
I.7.1. Définition.....	7
I.7.2. Critère de dureté sous cordon .....	7
I.8. Principe de la détermination d'une qualité d'acier au moyen de l'essai de flexion par choc.....	9
I.9.Calcul sur le cordon de soudure.....	9
I.9.1. Calcul des soudures bout à bout.....	9
I.9.2. Soudure bout à bout à pénétration complète.....	9
<hr/>	
<i>partie expérimentale</i>	10
<hr/>	
II : Réalisation de tubes au niveau de l'entreprise ALTUMET Spa filiale Anabib.....	10
II. 1. Présentation de l'entreprise.....	10
II. 2. Circuit de fabrication de tubes et normes utilisées.....	10
II. 3. Outils de contrôle de la qualité de la soudure à l'échelle industrielle.....	11
II.4. Caractéristique d'une soudure en acier HLE.....	12
II.4. 1. Transfert de chaleur pendant le soudage.....	12
II. 4.2. Formation du cordon de soudure.....	13
II. 5. Défauts de soudure éventuels des les aciers HLE.....	15
II.5.1. Défaut géométriques.....	15
II.5.2. Inclusions.....	16
II.5.3. Défauts métallurgiques.....	16
III. Résultats et Interprétations.....	19
III.1. Analyse de la Composition chimique .....	19
III.1.1. Composition chimique de l'acier X52.....	19
III.1.2. Composition chimique de l'acier X60.....	19
III.1.3. Détermination de la soudabilité.....	20

III.2. Etat métallographique .....	21
III.2.1. Etat métallographique de l'acier X52.....	21
III.2.2. Etat métallographique de l'acier X60.....	22
III.2.3. Interprétations des résultats de l'étude métallographique.....	23
III.3. Résultats des essais de résilience.....	25
III.3.1. Résilience de l'acier X52.....	25
III.3.2. Résilience de l'acier X60.....	26
III.4. Résultats de l'essai de traction .....	27
Conclusion.....	30
Références bibliographique.....	31

---

## Introduction

L'utilisation des aciers à haute limite élastique est très répandue dans plusieurs industries vue leurs diverses nuances et donc une grande variété de caractéristiques mécaniques. Pour notre étude on a choisi les nuances API 5L X52 et X60 utilisés pour la fabrication de tubes soudés spirale, servant au transport des hydrocarbures et de l'eau. Pour cela nos aciers doivent répondre à plusieurs exigences telles que la résistance mécanique, l'aptitude au formage, la soudabilité ou encore la résistance à la corrosion.

En amont de la réalisation des tubes les aciers en questions sont élaborés en choisissant convenablement, et le procédé d'élaboration et les éléments d'alliages. Par la suite la mise en forme des tôles par un laminage à chaud contribue à conférer une bonne tenue mécanique à l'acier.

Nos matériaux subissent une opération de soudage ce qui conduit inévitablement aux transformations liées à cette opération qui induit des transformations intrinsèques en terme de fragilisation de la zone soudée et de la diminution de la résistance à la corrosion. En aval à l'opération de soudage, les tubes sont revêtus par des polymères leurs permettant d'être protégés de la corrosion.

Compte tenu du contexte général lié au matériau en question, dès son élaboration, sa transformation en produit fini et par la suite son utilisation, notre choix d'étude s'est porté sur la zone avoisinante et comportant le cordon de soudure à savoir le métal fondu, la zone affectée thermiquement et le métal de base adjacent à cette dernière.

Pour cette étude, on a procédé à une synthèse bibliographique représentant la partie théorique de notre travail, ainsi on met à notre disposition le maximum de données relatifs à notre sujet, cette partie comporte trois champs d'étude :

- Contexte industriel du soudage des pipelines
- Réalisation de tubes au niveau de l'entreprise ALTUMET Spa filiale Anabib
- Caractéristique d'une soudure en acier HLE

La deuxième partie de notre étude est une continuation du travail de projet de fin d'étude (PFE CHIKHI.K, Département Métallurgie, ENP 2014). Nous allons analyser la composition chimique de nos matériaux et l'influence des éléments d'alliage sur ces derniers. Une étude métallographique est réalisée afin de présenter l'état microstructural ainsi que les essais de résilience afin d'apprécier le comportement entre le X52 et le X60. Enfin on procédera à l'analyse d'images faites par un microscope électronique à balayage dans le but de répondre à certaines questions.

## **Partie théorique**

### **I. Contexte industriel du soudage des pipelines**

#### **I. 1. Importance économique de l'industrie des pipelines**

Près de la moitié des entreprises privées mondiale sont des compagnies pétrolières ou de construction d'automobile qui toutes dépendent de l'industrie pétrolière, c'est dire que cette énergie fossile est le nerf économique de toutes nos sociétés.

Cependant les gisements de pétrole étant limités et leur emplacement géographique ne coïncidant généralement pas avec celui des pays consommateurs, l'exploitation des ressources pétrolières est source de tension. Les pays consommateurs, généralement de grandes puissances, sont alors tentés d'employer tous les moyens de pression pour avoir accès à ces ressources. Cette tension est définie par la géopolitique du pétrole qui décrit l'impact de la demande et de l'offre sur la politique des pays consommateurs et producteurs d'hydrocarbures. Dans ce contexte l'ampleur des moyens de transport reliés au pétrole devient très importante au même titre que l'offre et la demande sur cette matière.

À partir de années 1970, les effets de la mondialisation, la volonté croissante d'autonomie des pays producteurs, le recours aux règles du commerce international, la crainte des conséquences d'interventions trop musclées, et l'obsession de la sécurité d'approvisionnement ont généré l'émergence de méthodes plus fines dont la « diplomatie du pipeline »

Cela nous conduit à pouvoir évaluer l'impacte de l'industrie des pipelines sur la senne géopolitique du pétrole en traversons les frontières et même les continents afin de relier les pays producteurs et les pays consommateurs en toute continuité. Il est donc clair que l'industrie des pipelines est incontournable au milieu de l'économie pétrolière.

#### **I. 2. Procédés de fabrication par soudage**

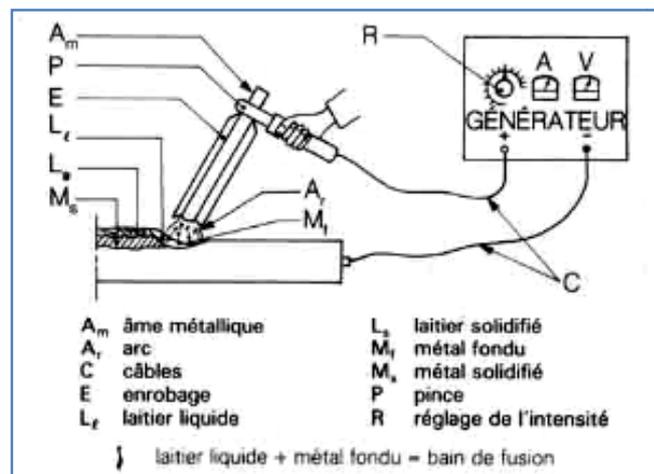
Les procédés de soudage utilisés en construction métallique peuvent être classés en trois catégories :

- *Soudage manuel* : reste le seul moyen possible pour réaliser des soudures d'accès difficile ou des soudures de petite longueur.
- *Soudage semi-automatique* qui procède par avancement automatique de l'électrode avec une torche tenue à la main. Ce procédé de soudage est le plus couramment utilisé.
- *Soudage automatique*, pour lequel la tête de soudage est montée, soit sur un chariot dont l'avancement est automatique, soit sur un robot de soudage. Il permet notamment de réaliser des soudures continues d'une certaine longueur : assemblage âme/semelles des profilés reconstitués soudés (PRS) par exemple.

### I.2.1. procédé manuelle

Le soudage manuel avec électrode enrobée constitue l'un des modes opératoires de soudage à l'arc le plus répandu. Il nécessite un personnel très qualifié pour que les soudures ainsi réalisées soient de bonne qualité.

Ce procédé, désigné aussi en anglais par l'acronyme (SMAW), est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder (figure I.1). L'énergie calorifique de l'arc fait fondre simultanément et très localement la pièce à assembler, l'âme métallique de l'électrode et l'enrobage pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur qui se détache plus ou moins facilement. L'enrobage de l'électrode fond avec un léger retard par rapport à l'âme métallique. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler [1].



*Figure I.1 : Principe de soudage manuel.*

### I. 2. 2. Procédés automatiques et semi automatiques

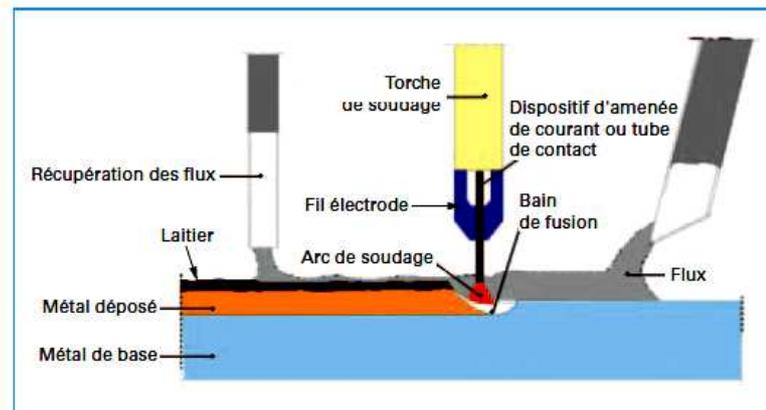
On distingue dans le soudage automatique ou semi-automatique deux types de procédés qui sont le soudage sous flux solide en poudre et le soudage sous flux gazeux.

Ces procédés sont particulièrement intéressants pour réaliser des joints soudés longs (supérieurs à 1 m de longueur). Les vitesses de soudage élevées et l'opération en continu autorisent une productivité élevée [2].

#### I.2.2.1. Soudage automatique sous flux solide en poudre

Il s'agit d'un procédé entièrement automatisé dans lequel la tête de soudage se déplace de façon automatique le long du joint (figure I.2). L'électrode est constituée d'un fil nu, disponible en bobine, dont l'avancement est commandé par un moteur asservi. Le flux, qui se présente sous forme de fines particules, est déposé en continu à la surface du joint, juste en

avant de la torche de soudage. L'arc électrique est immergé sous la surface du flux dont il fond une partie pour former un laitier qui se solidifie immédiatement après, assurant ainsi la protection de la soudure vis-à-vis de l'air ambiant [3].

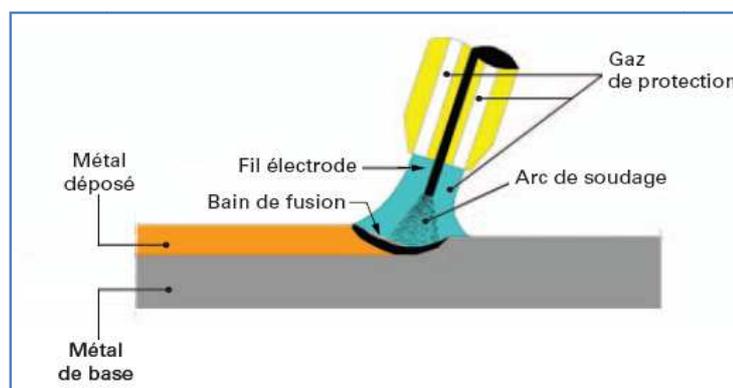


*Figure I.2 : Principe de soudage automatique.*

### **I.2.2.2. Soudage sous flux gazeux**

Pour le soudage sous flux gazeux (procédés MIG, MAG et TIG) (figure 8), la protection vis-à-vis de l'atmosphère ambiante est obtenue par un gaz insufflé dans une buse concentrique au fil de l'électrode comme l'illustre le schéma de la figure I.3.

- Le procédé MIG (abréviation de « Metal Inert Gas ») utilise un gaz inerte, c'est-à-dire une atmosphère protectrice chimiquement inerte, généralement de l'argon ou de l'hélium.
- Le procédé MAG (pour « Metal Active Gas ») utilise un gaz actif, du dioxyde de carbone ou un mélange argon/dioxyde de carbone.
- pour le TIG (Tungsten Inert Gas) utilise une électrode en tungstène et donc inconsommable ; le métal d'apport est assuré par un fil indépendant [2].



*Figure I.3 : principe de soudage sous flux gazeux.*

### I. 3. Importance des normes

La recherche et de la sécurité des pipelines a conduit à l'application sur le marché d'un nombre important d'aciers destinés à la fabrication des ces tubes. Les préoccupations essentielles à l'introduction d'éléments d'alliage dans ces aciers sont liées à l'augmentation des caractéristiques de traction, à une mise en œuvre aisée et à des conditions de travail très sévères. Au sein de cette divergence l'utilisation des normes est plutôt un gage de fiabilité et de qualité [4]. Le tableau I.1 ci-dessous nous permet de comparer les caractéristiques des différentes nuances d'aciers ainsi normalisé, cela nous montre entre autre l'importance de la normalisation.

*Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques des aciers des tubes selon les l'API 5L[4]*

	Direction	Epaisseur (mm)	R <sub>e</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A <sub>50</sub> (%)	KV 0°C (J)	DWTT 10°C (%)
Grade B AFCS	T	5 - 20	241 - 448	414 - 758	≥ 28,8	≥ 27	≥ 100
X42 AFCS	T	5 - 20	290 - 496	414 - 758	≥ 28,8	≥ 27	≥ 100
X46 AFCS	T	5 - 20	317 - 524	434 - 758	≥ 27,5	≥ 27	≥ 100
X52 AFCS	T	5 - 20	359 - 531	455 - 758	≥ 26,4	≥ 40	≥ 85
X56 AFCS	T	5 - 20	386 - 544	490 - 758	≥ 24,7	≥ 40	≥ 85
X60 AFCS	T	5 - 20	414 - 565	517 - 758	≥ 23,5	≥ 40	≥ 85
X65 AFCS	T	5 - 20	448 - 600	531 - 758	≥ 23	≥ 40	≥ 85
X70 AFCS	T	5 - 20	483 - 621	565 - 758	≥ 21,7	≥ 40	≥ 85
X80 AFCS	L	5 - 14	-	-	-	≥ 40	-
	T	5 - 14	552 - 690	621 - 827	≥ 20	-	≥ 85

### I. 4. Critères de choix des nuances d'acier en vue du soudage

Au stade de la conception d'une construction soudée, divers critères sont à prendre en considération afin de définir des nuances susceptibles d'être appropriées pour chacun des éléments constitutifs de la construction suivant les propriétés mécaniques, chimiques et l'état structural.

Les critères à considérer sur le plan technique sont :

- La température d'utilisation,
- Le niveau de contrainte en transit dans l'élément,
- Les éventuels phénomènes de corrosion ou d'abrasion,
- L'impératif de poids et/ou rigidité de la structure sous charge,
- La variabilité des actions conduisant à la fatigue mécanique ou thermique.

Les critères à considérer du point de vue économique sont :

- Le type de produit et mode de mise en forme,
- Les délais d'approvisionnement du produit,
- Les cadences de production (en série) de la construction,

En ce qui concerne les aciers HLE faiblement alliés destinés au soudage, il convient de préférer les nuances qui comportent une teneur modérée en carbone (C 0,20 %) et en manganèse (Mn 1,20 %), plutôt que celles s'adressant à des usages généraux (selon les normes NF EN 10083-1 à 3). En effet, ces dernières sont susceptibles de contenir un haut carbone, lequel donne lieu à une ZAT dont la dureté et la fragilité excessives et incompatibles avec l'impératif d'adaptation plastique, conduisent à réaliser un traitement thermique de revenu après soudage, pénalisant de la sorte le prix de revient de la construction [2].

### **I. 5. Classes de nuances d'acier au carbone utilisées en tuberie**

Le développement du transport d'hydrocarbures à grande distance a nécessité l'emploi de tubes à grand diamètre, exploités à des pressions très élevées. Pour éviter d'utiliser des épaisseurs difficile à souder et pour des économies d'acier on a eu recours à des nuances d'aciers à caractéristiques mécaniques améliorées.

On distingue les éléments d'addition à effet durcissant la ferrite. Souvent on diminue le taux du carbone pour améliorer la soudabilité ainsi que le phosphore dans le but d'augmenter la résilience. Afin d'éviter que l'acier soit sensible au vieillissement l'azote se présente toujours sous forme de combinaison. Par contre le manganèse est le seul élément d'addition qui soit favorable avec un effet durcissant limité.

Selon l'API les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes : acier au carbone faiblement alliés et les aciers à faible teneur en carbone faiblement alliés. Dans le premier groupe on trouve les aciers ferrito-perlitique de X42 à X52 ayant jusqu'à 0,3%C, 1,6%Mn, 0,1%Si. Dans le second groupe on trouve les aciers ferrito-perlitiques à basse teneur en carbone X50, X56, X65, X70 avec une composition chimique nominale de : 0,12%C, 0,45%Si, 0,25%S, 1,9%Mn, 0,1%V, 0,1%Nb et 0,015%Al.

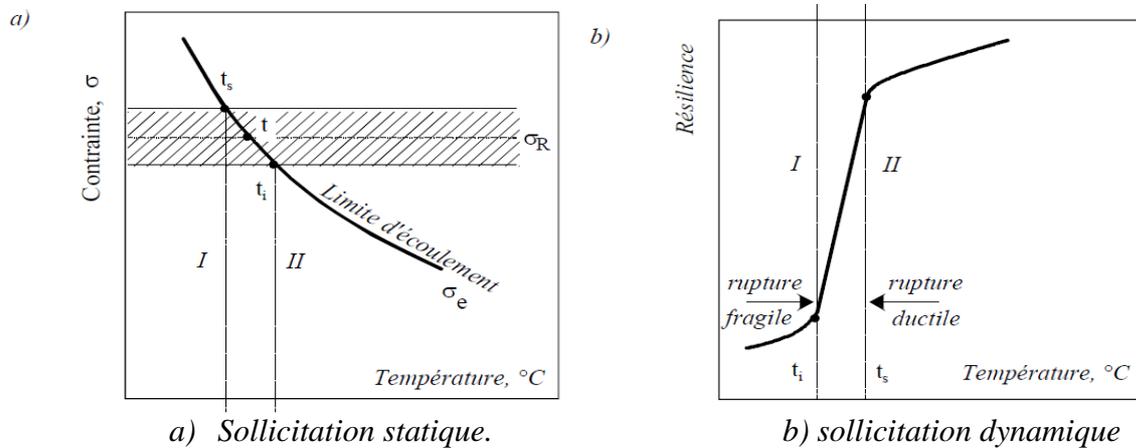
### **I. 6. Contraintes de services et phénomènes d'endommagement des pipelines**

Les aciers des tubes sont soumis à des actions extérieures et intérieures. Les actions extérieures engendrent des contraintes et des déformations qui modifient les états physiques et mécaniques du matériau, les actions internes favorisent l'apparition des contraintes internes liées essentiellement à une distribution inégale des déformations au sein du matériau. Ces contraintes peuvent être thermiques, de phase ou structurelles. Ainsi la résistance des tubes aux différentes actions définit leur tenue à la déformation, à la rupture et à la plasticité. Durant l'exploitation des pipelines, on a observé des ruptures ductiles et fragiles de leur matériau, ces dernières se propagent très rapidement et elles sont brusques provoquant ainsi beaucoup de dégâts. Par conséquent ces aciers doivent avoir impérativement une limite élastique élevée et une bonne résistance à la rupture fragile. De plus, la fiabilité des tubes est déterminée par les divers entailles et défauts internes qui servent d'amorce aux fissures en rendant la distribution des contraintes irrégulière.

D'autre part la baisse de la température rend le métal plus fragile lorsque ce dernier dépasse la température de transition, donc on remarque une transition de l'état ductile à l'état fragile. Ainsi la température de service doit être plus élevée que la température de transition.

Enfin les tubes sont l'objet de destruction graduelle sous l'action de la corrosion et la fatigue qui déterminent leur durée de vie.

La figure I.4 ci- dessous montre les détails relatifs à la transition de la rupture fragile et ductile en fonction de la température.



*I* : rupture fragile, *II* : rupture ductile.

$t_i$ ,  $t_s$  : frontières inférieure et supérieure de l'intervalle critique de température de fragilité.

**Figure I.4** : Schéma de la rupture fragile et de la rupture ductile [3].

## I.7. Méthodes d'étude de la soudabilité des aciers

### I.7.1. Définition

Par définition, la soudabilité de l'acier est son aptitude à être assemblé par un procédé de soudage, qui assure effectivement la continuité métallique du matériau. On peut envisager la soudabilité sous trois aspects principaux :

- a) Soudabilité opératoire
- b) Soudabilité métallurgique
- c) Soudabilité constructive

On se limitera ici à l'étude de la fissuration à froid sous cordon

### I.7.2. Critère de dureté sous cordon

Le critère de dureté sous cordon (HV 350 maxi par exemple), longtemps et encore actuellement retenu comme base d'admissibilité de QMOS, provient d'une époque où le rôle de l'hydrogène et celui des contraintes étaient sous-estimés, voire ignorés, et la seule notion de dureté, associée à une catégorie unique d'aciers (C-Mn tels que ) et à un seul procédé de soudage permettait de rendre compte de la probabilité de fissuration à froid.

L'évolution des élaborations d'aciers d'une part (microalliés et faiblement alliés), ainsi que celle relative aux techniques et aux produits d'apport de soudage d'autre part (à bas hydrogène), confortées par les résultats des études de fissuration à froid par la méthode des implants, ont fait clairement apparaître que le critère de dureté était aujourd'hui inadapté pour

constituer une base d'admissibilité de QMOS sur le plan du risque de fissuration qu'il est sensé représenter.

Un tel critère se doit toutefois d'exister sur le plan de la garantie de l'adaptation plastique de la ZAT lors de la mise sous charge de l'assemblage, et sa valeur se doit d'être modulée en fonction de la répartition de la martensite dans le volume de la ZAT, laquelle dépend de la nuance de l'acier ainsi que du MOS (influence de l'autorevenu en soudage multipasse ou technique *temper bead*).

### I.8. Principe de la détermination d'une qualité d'acier au moyen de l'essai de flexion par choc

Cette méthode permet d'élaborer une formule permettant d'exprimer assez simplement la température minimale d'utilisation sous charge ( $T_{min}$ ) en fonction des divers paramètres susceptibles d'influencer la rupture fragile, lesquels sont convertis en termes de température. Il convient de préciser que la formulation est établie sur la base de défauts « équi-KI » de forme semi-elliptique (défauts débouchants) ou rectiligne (défauts traversants) dont les dimensions fixées arbitrairement peuvent être considérées comme industriellement réalistes [5]. Sur la figure I.5 on voit un exemple pour le S355.

La formulation générale s'exprime par :

$$T_{min} = 1,4 TK_{28} + 70 \ln \left( \frac{f_y - 50}{360} \right) + \Delta T(e) + (83 - 0,08 f_y)(d\varepsilon/dt)^{0,17} + \Delta T(\sigma/f_y) + 25$$

Avec :

- $TK_{28}$  la température à laquelle est garantie l'énergie de rupture de 28 joules,
- $f_y$  la limite d'élasticité garantie de l'acier,
- $\Delta T(e)$  la fonction de l'épaisseur,
- $\Delta T(\sigma/f_y)$  une fonction du niveau de contrainte ( $\sigma = \sigma_G + \sigma_u$ ) qui s'exerce au voisinage du défaut,
- $d\varepsilon/dt$  une vitesse de déformation élastique au voisinage du défaut.

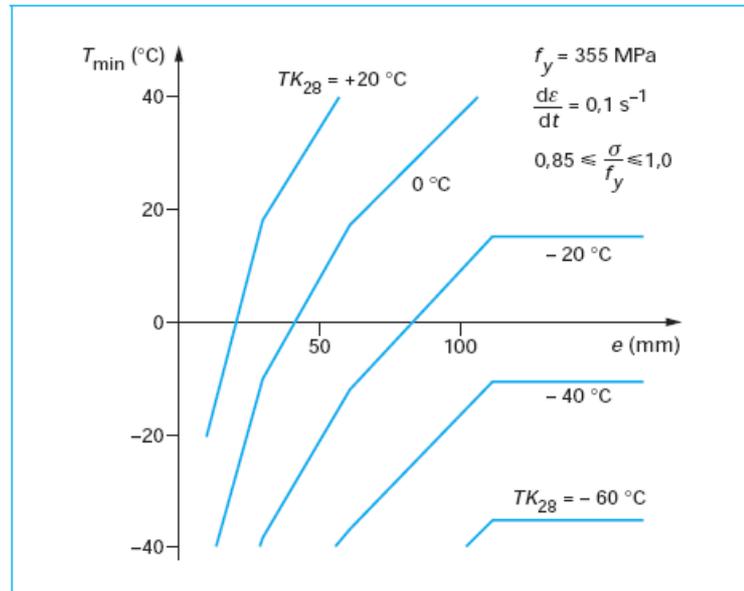


Figure I.5 : évolution de  $T_{min}$  en fonction de  $e$  et de  $T_{K_{28}}$  dans le cas de l'acier S355

## I.9. Calcul sur le cordon de soudure

### I.9.1. Calcul des soudures bout à bout

Si la procédure de soudage est correctement suivie, le métal d'apport des soudures bout à bout est assimilé au métal de base. Pour la détermination de la résistance de l'assemblage, le calcul est donc fondé sur l'aire de la section de gorge, c'est-à-dire de la zone de pénétration [2].

### I.9.2. Soudure bout à bout à pénétration complète

Dès que la pénétration concerne toute l'épaisseur des plats à assembler, on restaure en quelque sorte la continuité et la section résistante n'est donc pas diminuée comme l'illustre la figure I.6. On peut simplement considérer que la soudure bout à bout se substitue au matériau de base [2].

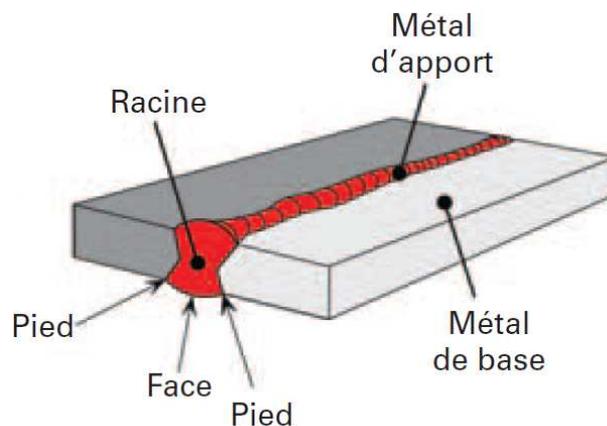


Figure I.6 : Terminologie employée pour les soudures bout à bout.

## Partie pratique

### II : Réalisation de tubes au niveau de l'entreprise ALTUMET Spa filiale Anabib

#### II. 1. Présentation de l'entreprise

L'unité de tuberie spirale **ANABIB**, issue de la nouvelle restructuration de l'Entreprise Nationale de Tube et Transformation des Produits Plats « **ENTTPP** », est implantée à la Zone Industrielle de REGHAIA, depuis 1959, par le groupe Français « **VALLOUREC** » sous le nom d'**ALTUMEC**. Suite à la politique commerciale introduite en l'an 2000, l'unité **GROS TUBES** est devenue une FILIALE de ANABIB avec une nouvelle organisation structurelle, sous le nom d'**ALTUMET** « Algérienne Tubes Métallique S.P.A. ».

La tâche principale de l'entreprise est fabrication et le contrôle des tubes soudés spirale à partir de bobines en aciers HLE ainsi que distribution des produits et dérivés tel que les tubes soudés destinés au transport d'hydrocarbures, eau et autre, livrés à l'état non revêtu ou enrobé en PE triple couche.

**ALTUMET** est soumise à la norme EN 49-710 pour le revêtement extérieur en polyéthylène tri couche et EN XP 49709 pour le revêtement intérieur, pour assurer la protection durable et maximale, pour la fabrication des tubes c'est la norme américaine API 5L qui est appliqué.

Pour assurer la production et le contrôle des tubes l'entreprise est dotée d'une machine de soudage NLAT automatisée qui réalise la préparation des bouts par chanfreinage et le soudage SAW spirale.

#### II. 2. Circuit de fabrication de tubes et normes utilisées

Le tube soudé en spiral est réaliser à l'intérieur d'une cage de formage à partir d'une tole d'acier laminée et enroulée à froid suivant une norme hélicoïdale conformément aux spécification de la norme API 5L PSL2 44<sup>ème</sup> édition. Pour les produits à revêtir la norme NF A49 150 est de rigueur pour les revêtements.

Afin de mieux comprendre la méthode permettant la réalisation des tubes on se doit de présenter les étapes de fabrication. Pour une meilleure didactique, ces différentes étapes sont représentées dans l'organigramme de la figure II.1.

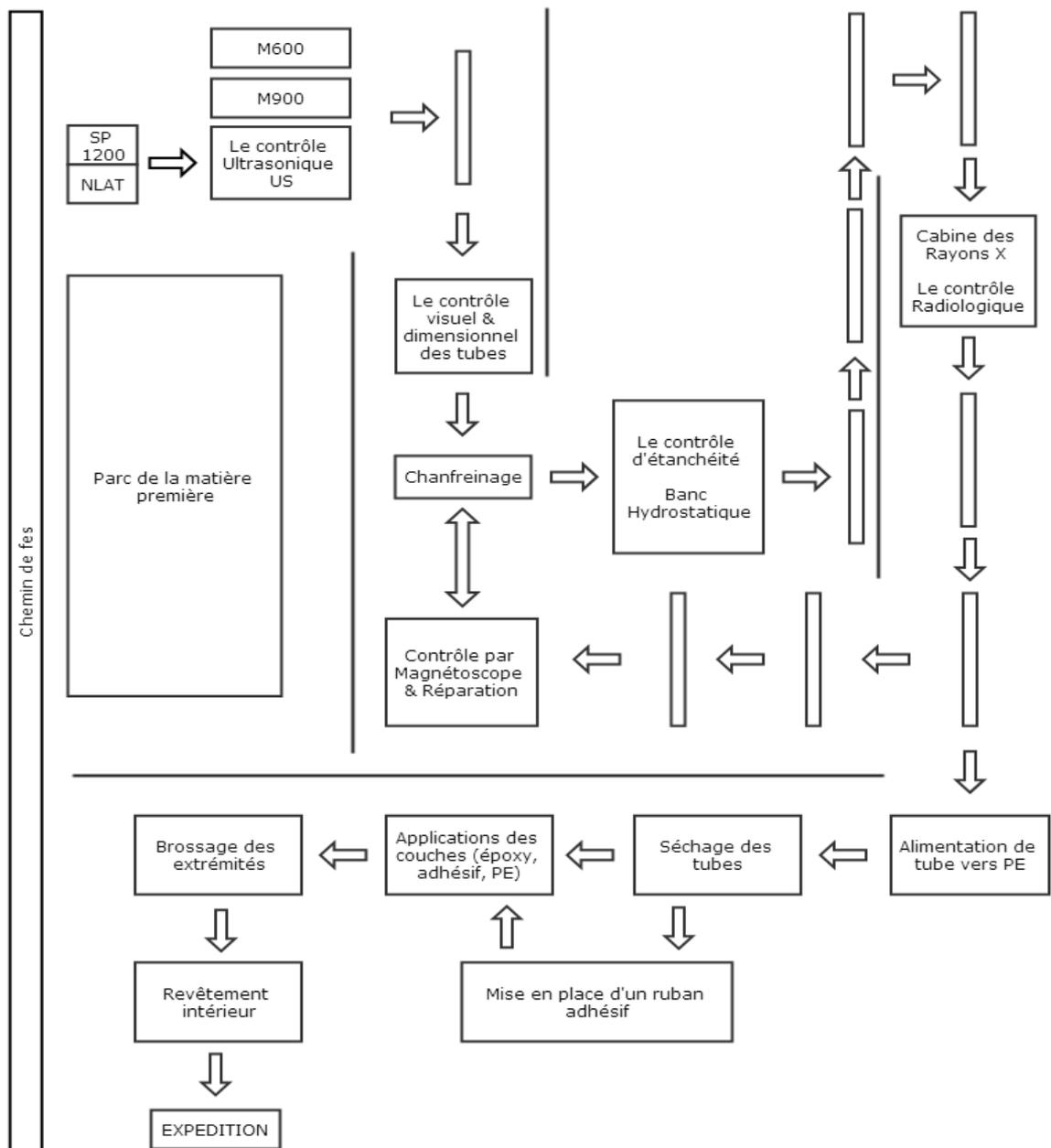


Figure II.1 : Organigramme de la production au sein de ALTUMET SPA

### II. 3. Outils de contrôle de la qualité de la soudure à l'échelle industrielle

Toute opération de soudage nécessite obligatoirement à la fin de l'opération un contrôle de qualité.

La qualité de celle-ci peut être contrôlée à l'échelle industrielle par différentes méthodes qui sont :

- Le contrôle métallurgique au Laboratoire des essais mécaniques
- Le contrôle non destructif CND :
- le contrôle visuel
- le contrôle par ressuage
- le contrôle par magnétoscopie
- le contrôle par radiographie
- le contrôle par ultrasons

Ces méthodes sont généralement effectuées quelques heures après réalisation de la soudure. Ce délai dépend de l'épaisseur du cordon, de l'énergie de soudage et de la nuance d'acier des pièces assemblées.

- Le contrôle destructif : ce contrôle se vérifie lors de l'essai de traction sur une éprouvette contenant le cordon, la rupture doit se faire dans le métal de base et non dans le cordon [2].

## **II.4. Caractéristique d'une soudure en acier HLE**

### **II.4. 1. Transfert de chaleur pendant le soudage**

Pendant l'exécution d'une passe de soudage si l'on mesure la température en un point bien déterminé (figure II.2), par sa distance à l'axe du joint et sa hauteur dans l'épaisseur de pièces, on relève en ce point l'évolution de la température en fonction du temps ;  $\theta = f(t)$ [6].

La loi suivant laquelle la température varie en fonction du temps porte le nom de cycle thermique. Le cycle thermique, par les renseignements qu'il apporte :

- La phase de réchauffage
- La température maximale atteinte au point de mesure  $\theta_M$ .
- Temps de séjour à haute température
- Une phase de refroidissement avec l'allure de refroidissement  $V_r$ .

Donne le traitement thermique localement subi par le métal.

Les cycles thermiques dépendent des variables suivantes :

- Position et distance du point considéré par rapport à la ligne de soudure ;
- Procédé de soudage et ses paramètres ;
- Epaisseur des pièces et type de joint ;
- Température initiale de la pièce [7].

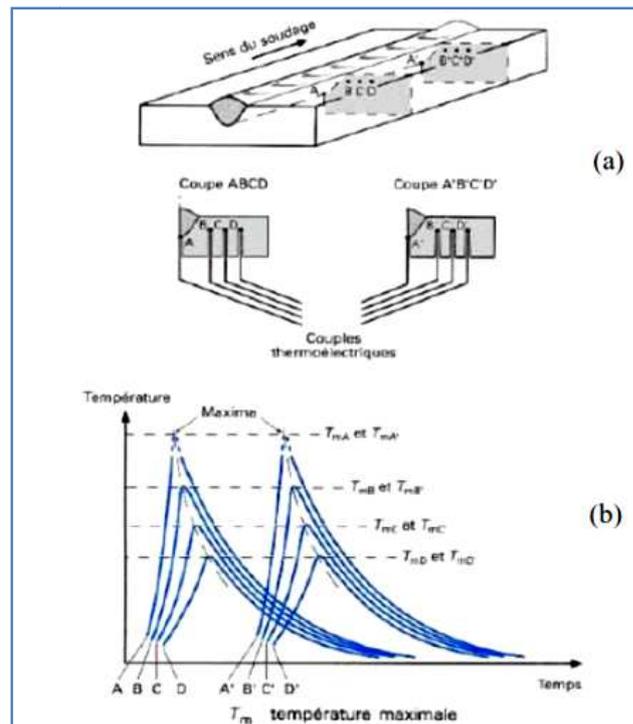


Figure II.2 : Cycles thermiques de soudage [6].

Si lors d'un TTAS ultérieur, d'un traitement thermique de détensionnement intermédiaire ou en service, la température du traitement thermique du matériau de base était trop largement et trop longtemps dépassée, les précipités pourraient se dissoudre à nouveau, ce qui entraînerait une réduction des propriétés mécaniques du matériau de base.

## II. 4.2. Formation du cordon de soudure

### a) Fusion de l'électrode

L'arc électrique se forme entre l'électrode et la pièce à souder, cet arc porte l'âme de l'électrode, qui est le métal d'apport, à des températures élevées provoquant ainsi la fusion de l'électrode qui se dépose sur les bouts à souder.

### b) Solidification du cordon de soudure

Le métal se comporte comme un puits de chaleur dont l'efficacité varie avec la conductivité thermique et l'épaisseur de la pièce. De ce fait, des germes de solide apparaissent dès la température de liquidus à la surface du métal solide, en épitaxie sur celui-ci, l'épitaxie étant facile du fait de l'identité de composition des deux parties, sans barrière de germination ni surfusion. La taille de grains de solidification est déterminée par celle du métal de base du fait de la germination épitaxiale, mais par suite du chauffage, cette dernière a grossi ; aussi la microstructure du joint est-elle assez grossière de type colonnaire dendritique.

En soudage, la source de chaleur étant continuellement en déplacement, les gradients thermiques varient donc en intensité et en direction. La croissance des cristaux tend à s'effectuer suivant le plus grand gradient thermique. La microstructure résultante est régulière du fait que le régime thermique étant stationnaire. Les cristaux colonnaires de direction oblique par rapport au métal de base tendent au cours de leur croissance à s'orienter suivant

l'axe du cordon, souvent cette forme est dite basaltique, (figure II.3). La morphologie résultante des grains de solidification dépend de la vitesse de soudage, qui conditionne la forme des gradients thermiques [8].



**Figure II.3 :** Orientation des grains dans la ZF de l'acier X52 lors du refroidissement.

### **c) Phénomènes de ségrégations**

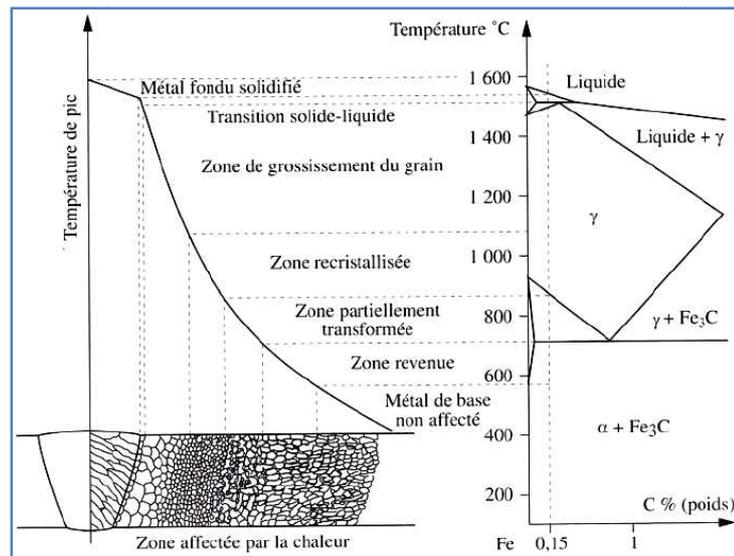
Lors du soudage l'effet thermique n'est pas négligeable, or se chauffage peut provoquer soit la précipitation des dispersoïde ou même parfois leurs dissolution selon l'importance de la chaleur que rassoie le matériau. Dans le cas d'un soudage à plusieurs passes l'influence de la seconde passe sur la première passe est relativement détectable, en premier lieu sue la structure métallographique, deuxièmement vue l'apport de chaleur sur la première passe qui va favoriser une précipitation des dispersoïdes ou la diffusion de certains d'autre [9].

### **d) Différentes zones microstructurales du cordon de soudure**

Le soudage en lui-même provoque un véritable traitement thermique dans la zone voisine de la soudure, le plus communément appelée *ZAT* (*zone affectée thermiquement*). Il s'ensuit couramment, grâce aux transformations de phase et aux formations de précipités, soit un adoucissement local trop important, soit une fragilisation [10].

La caractérisation d'un acier est fonction de sa nature et de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition chimique et aux traitements thermique que subissent la pièce à soudées.

Une étude métallographique d'un cordon de soudure fait apparaitre une diverse gamme de structures, cela est bien éclairci dans la figure II.4. On rencontre différents aspects sur les soudures qui sont causés par la variation du cycle thermique subit. La température et le temps de chauffage ainsi que les vitesses de refroidissement produisent des modifications qui affectent la dimension des grains et les phases en présence.



**Figure II.4 :** description des différentes zones microstructurales d'une soudure.

Le volume du bain de fusion est relativement restreint, cela conduit à un refroidissement rapide et les cristaux qui se solidifient sont orientés dans la direction du gradient de température (forme basaltique). Leurs dimensions dépendent de la température et de la cinétique de refroidissement [6].

## II. 5. Défauts de soudure éventuels des les aciers HLE

Les défauts les plus rencontrés dans une soudure sont, selon la norme nf a89-230, regroupés en six classes qui sont : fissure, cavités, inclusions, manque de fusion, défauts de forme et défauts divers. Pour notre étude on les classera en trois types [1]:

- les défauts liés à la géométrie du cordon ;
- ceux dus à des inclusions diverses au sein du métal en fusion ;
- ceux associés à des problèmes métallurgiques.

### II.5.1. Défaut géométriques

- **Morsures et caniveaux**

Pour ce cas le métal de base est plus ou moins « creusé » sur une partie du cordon. Une morsure est un défaut de petite taille alors qu'un caniveau est un défaut de grande taille qui peut traverser la soudure.

- **Épaisseur insuffisante ou surabondante**

Ces défauts correspondent à une épaisseur du cordon différente de la dimension prévue. Ils correspondent généralement à une mauvaise forme de la surface du cordon qui peut être trop convexe ou trop concave.

- **Manque ou excès de pénétration**

le manque de pénétration se traduit par une épaisseur du cordon inférieure à l'épaisseur de calcul, par contre l'excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Dans le cas d'une soudure monopasse, le métal peut déborder du côté opposé au cordon. Un manque de pénétration peut être associé à une mauvaise fusion des bords des pièces à souder.

### **II.5.2. Inclusions**

- **Inclusions solides**

Les inclusions solides désignent les éléments étrangers à la soudure comme le laitier par exemple.

- **Porosités ou inclusions de gaz**

Il s'agit de défauts sphériques creux provoqués par des bulles d'air ou de gaz emprisonnées dans le métal de base après refroidissement.

### **II.5.3. Défauts métallurgiques**

- **Fissures**

Il existe trois types de fissures susceptibles d'être présentes dans un cordon :

– fissuration à froid causée par des contraintes mécaniques résiduelles importantes ou la présence d'hydrogène dissous.

– fissuration à chaud créée par une ségrégation métallurgique au sein du cordon.

– arrachement lamellaire (inclusions de gaz enfermées dans l'acier lors de sa fabrication lors du laminage.

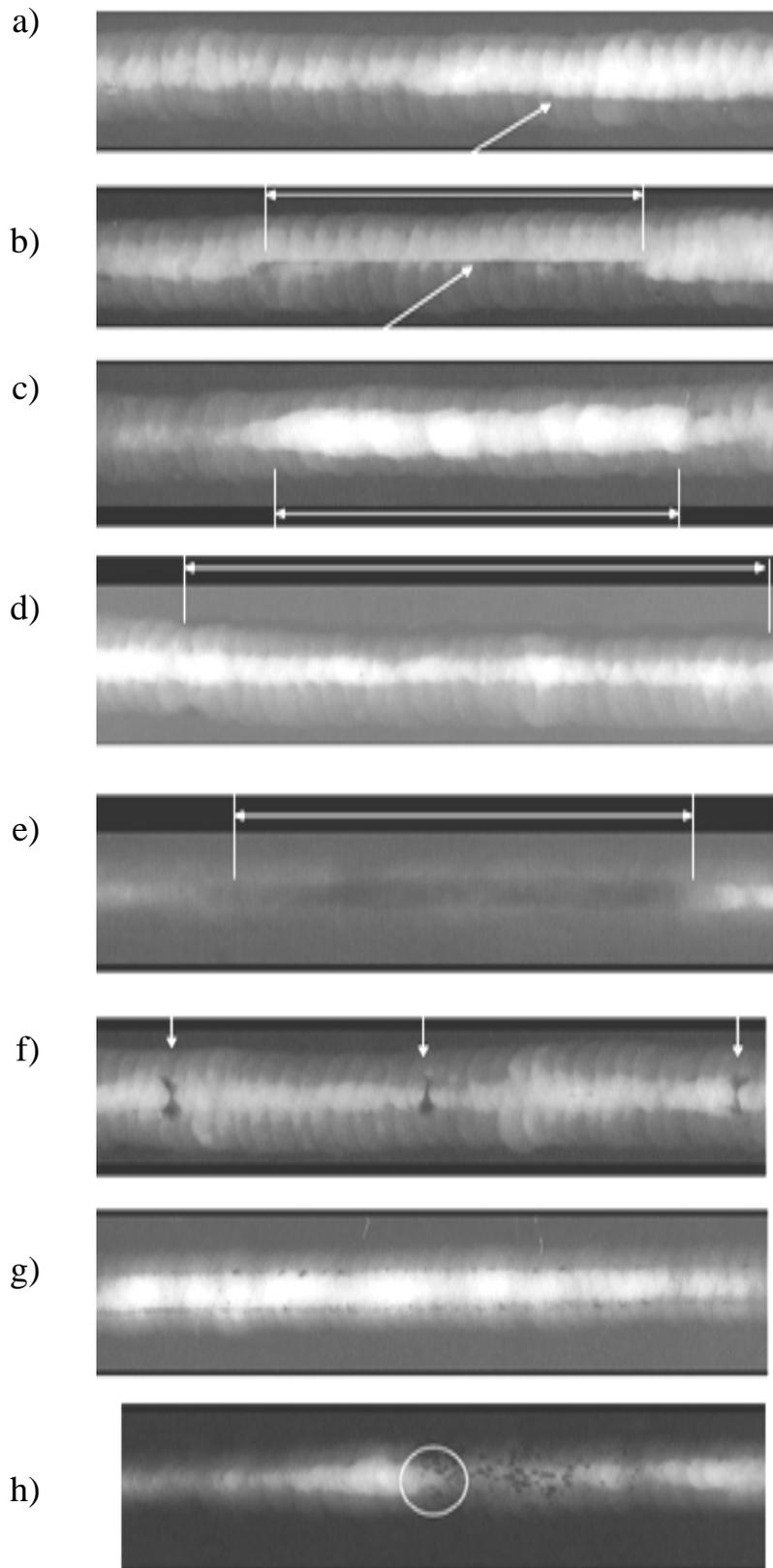
- **Retassures et criques de solidification**

Les retassures et les criques de solidification sont provoquées par un retrait du métal lors de son refroidissement. Un vide se forme, il peut apparaître à la surface du cordon. On distingue ainsi les retassures, visibles à la surface du cordon, et les criques de solidification, qui sont internes et donc non apparentes.

- **Collage ou manque de fusion**

Si le métal de base ne fond pas correctement lors de l'opération de soudage, il se peut qu'il ne se lie pas correctement avec le métal déposé, entraînant ainsi une diminution de la section efficace de la soudure. Le collage peut être latéral, entre passes successives, ou à la racine de la soudure [2].

La figure II.5 montre quelques films de contrôle radiographique qui illustrent les différents défauts de soudure.



*Figure II.5 : Défauts de soudage dans des cordons de soudure de l'acier X52 détectés par radiographie.*

Nous pouvons distinguer sur la figure les défauts suivants :

- a) L'image radiographique révèle un changement abrupte dans la densité du film sur toute la largeur de l'image de la soudure et de façon longitudinale.
- b) Un désalignement des pièces à souder (Offset ou Hi-Lo) et un remplissage insuffisant à la racine du joint. L'image radiographique révèle un changement abrupte dans la densité du film dans le centre de la largeur du cordon de soudure, on remarque de façon longitudinale une zone de densité plus sombre. (Le long de l'arête, il y a un changement de densité.)
- c) Pénétration excessive (glaçon) Quantité de métal d'apport à la racine du cordon de soudure excédentaire. L'image radiographique révèle une densité plus clair dans le centre de la largeur de la zone de soudage. Cela peut s'étendre tout le long du joint de soudure ou, comme dans ce cas, à des zones isolées.
- d) *Caniveau externe* Sur la surface externe le long du joint de soudure et sur le bord de l'arête, amincissement du métal de base provoquant un « undercut ». L'image radiographique révèle une zone irrégulière de densité plus sombre. Lors d'un caniveau tel que celui-ci, la densité de ce défaut sera toujours plus sombre que la densité des pièces à souder.
- e) *Concavité interne à la racine* Sur la surface interne le long du joint de soudure , dépression dans le centre du cordon à la racine provoquant un creux à cette même racine. L'image radiographique révèle une zone allongée irrégulière de densité plus sombre avec une arête flou dans le centre de la largeur du cordon de soudure.
- f) *Inclusions de laitier en interpasse*. Ce sont habituellement des impuretés non métallique qui se sont solidifiées à la surface de la soudure et qui n'ont pas été correctement enlevées lors du nettoyage. L'image radiographique révèle des formes irrégulières de densité plus sombre et étroitement allongées et situées au hasard sur l'image de la zone soudée.
- g) *Manque de fusion (sur les côtés des plaques)*. Longs espaces vides allongés entre le dépôt de soudure et les surfaces du joint. L'image radiographique révèle des lignes droites de densité plus sombre parfois avec des points plus noirs dispersés tout le long du manque de fusion, étroitement allongées, droites et situées en parallèle ou seules dans le sens de la longueur. Ces lignes sont non sinueuses, comme des inclusions non métalliques, par exemple.
- h) *Nids de Porosités ou soufflures agglomérées*. Petites poches gazeuses rondes ou légèrement allongées regroupées ensemble. L'image radiographique révèle de petits points ronds allongés ou non, dont la densité est plus sombre, regroupés ensemble à divers endroits dans la zone soudée et de dimensions variées.

### III. Résultats et Interprétations

#### III.1. Analyse de la Composition chimique

La nuance d'acier dans laquelle est fabriquée ce tuyau suit la norme de l'*American Petroleum Institut* : API 5L X52. La composition chimique de l'acier soudé spirale, présentée dans les tableaux IV.1, doit être conforme aux exigences de la dernière édition de la norme API 5L PSL2. L'analyse chimique sur le métal X52 et X60 fut effectuée au niveau de l'entreprise ALTUMET Spa Réghaia sur un spectromètre de masse.

L'importance de la composition chimique apparaît par son influence sur la soudabilité, les caractéristiques mécaniques ainsi que la résistance à la corrosion. Il est donc indispensable de toujours vérifier se paramètre afin de satisfaire toutes les exigences moyennant un compromis entre les différentes contraintes.

##### III.1.1. Composition chimique de l'acier X52

Les aciers à haute limite élastique sont caractérisés par leurs teneur en Mn ce qui leur confère un durcissement de la ferrite, une augmentation de trempabilité, l'affinement du grain, la désoxydation et la fixation du soufre sous forme de sulfure. L'intérêt des autres éléments qu'on voit dans le *tableau III.1* est suffisamment décrit dans le PFE.

*Tableau III.1 : composition chimique X52*

	C%	Mn	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%
<b>Max (API 5L)</b>	0.12	1.60	0.30	0.02	0.015	0.1	0.25	0.05
<b>%</b>	0.074	0.770	0.120	0.003	0.002	0.025	0.024	0.008

Co%	Cu%	Nb%	Ti%	V%	W%	Sn%	B%	Fe%
<b>0.05</b>	0.25	0.05	0.05	0.05		0.01	0.0005	
<b>0.001</b>	0.028	0.038	0.052	0.009	0.006	0.008	<0,000	

##### III.1.2. Composition chimique de l'acier X60

Il est très intéressant de comparer les différentes nuances et cela en usant de plusieurs moyens tels que l'effet des éléments d'alliage sur le comportement mécanique ou leur

soudabilité en fonction du carbone du carbone équivalent. On retrouve dans le *tableau III.2* les éléments d'addition composant le X60.

**Tableau III.2 : composition chimique pour le X60**

	<b>C%</b>	<b>Mn</b>	<b>Si%</b>	<b>P%</b>	<b>S%</b>	<b>Cr%</b>	<b>Ni%</b>	<b>Mo%</b>
<b>Max (API 5L)</b>	0.12	1.60	0.30	0.02	0.015	0.1	0.25	0.05
<b>Teuneur%</b>	0.093	1.250	0.246	0.000	0.005	0.038	0.029	0.011

<b>Al%</b>	<b>Cu%</b>	<b>Nb%</b>	<b>Ti%</b>	<b>V%</b>	<b>W%</b>	<b>Sn%</b>	<b>B%</b>	<b>Fe%</b>
<b>0.05</b>	0.25	0.05	0.05	0.05		0.12	0.0005	
<b>0.036</b>	0.002	0.02	0.05	0.006	0.036	0.001	0.002	0

Il est vrai que la composition chimique du X52 ne comporte pas de très grande différence avec celle du X60, comme on peut le voir sur les tableaux ci-dessus, mais ces petites variations induisent l'apparition des différences entre les deux nuances quant à la résistance mécanique et la résilience. On pourra se référer par exemple à la teneur en carbone et en manganèse ou encore aux éléments dispersoïdes.

Le calcul du carbone équivalent ainsi que le Nickel équivalent et le chrome équivalent, qu'on verra par la suite, peut s'avérer cruciale pour l'exploitation du diagramme de Sheaffler-Delelong afin de mieux comparer les caractéristiques des aciers X52 et X60 à partir du *tableau I.1 et l'effet du carbone équivalent à partir de la figure I.3*).

### III.1.3. Détermination de la soudabilité

La figure ci-dessous présente les différentes zones relatives à la soudabilité des aciers HLE en fonction du carbone et du carbone équivalent en exploitant les teneurs en éléments chimiques représentées dans les tableaux VI.1 et VI.2.

On remarque aussi l'évolution de la soudabilité des différentes nuances en file du temps par l'amélioration de la composition de ces derniers.

Le carbone équivalent est calculé par la formule suivante qui est celle de l'Institut International de la Soudure (IIW) reprise dans la norme EN 10025 :

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

Le calcul de Carbone équivalent pour le X52 et le X60 nous donne :

Pour le X52,  $C_{eq} = 0,24$  alors que le %C = 0,035

Pour le X60,  $C_{eq} = 0,33$  et que le %C = 0,12

Il est aisément remarquable lors qu'on projette ces résultats sur diagramme de la figure III.1 que la soudabilité de nos deux échantillon est dans la zone I qui correspond au domaine de la bonne soudabilité [13].

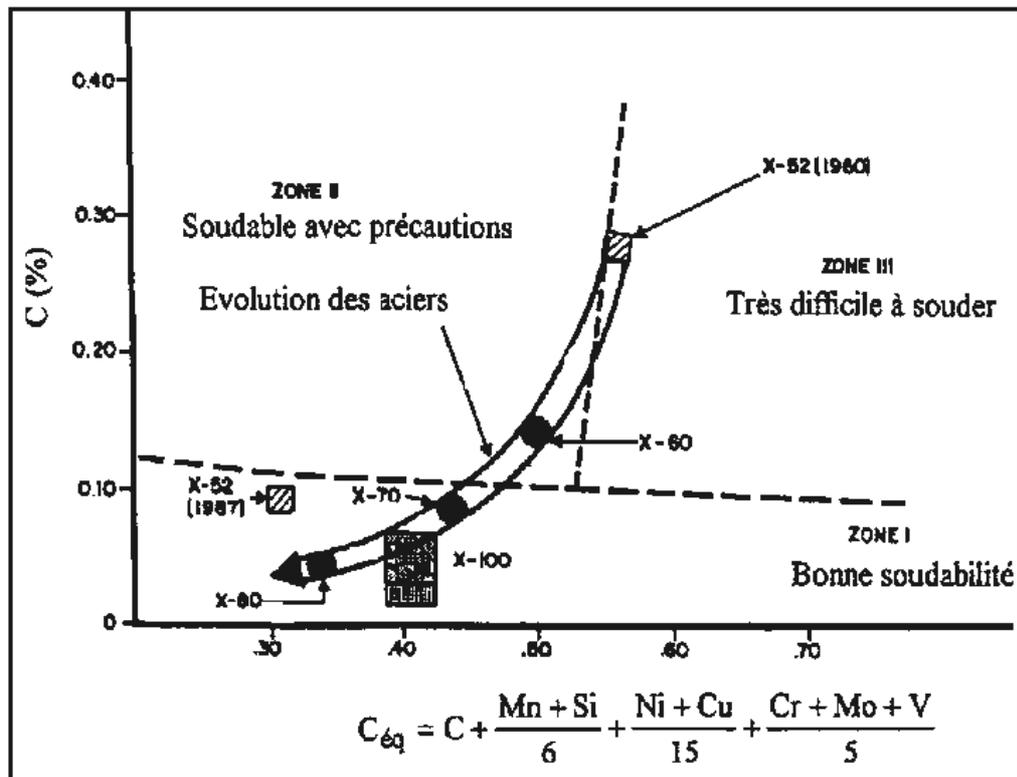


Figure III.1 : évolution de la soudabilité en fonction du  $C_{eq}$ .

## III.2. Etat métallographique

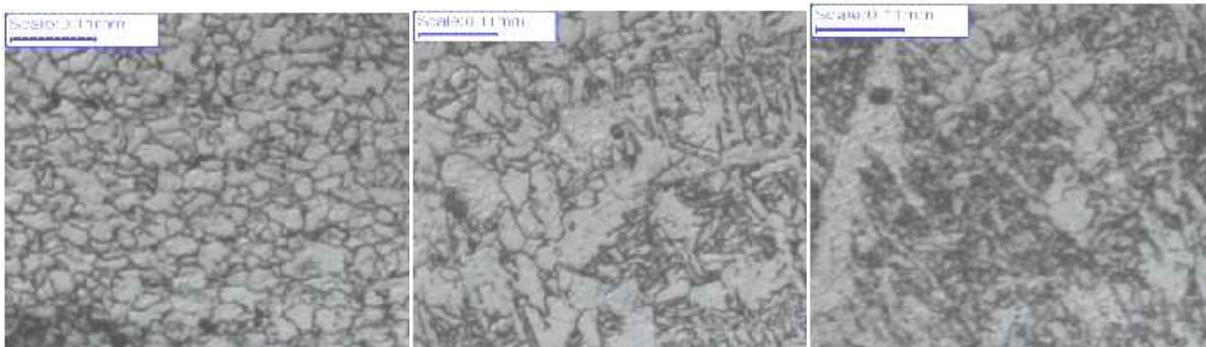
L'étude métallographique est indétournable pour avoir un premier aperçu sur l'état structural d'un matériau. On verra ci-dessous toute l'analyse faite à partir des images qu'on a réalisées pour les échantillons des deux nuances étudiées.

### III.2.1. Etat métallographique de l'acier X52

Nous observons sur la figure :III.2 des bandes de perlite colorées en noir alternées avec des bandes de ferrite en blanc, signe d'un laminage, cependant les traces de ce laminage tend à se dissiper vu que le laminage est fait à chaud, ce qui va provoquer une recristallisation, et c'est sous l'effet de cette recristallisation que le grain s'affine conduisant ainsi à l'augmentation de sa résistance.

On peut également dire que la ferrite est majoritaire dans le métal de base et la zone affectée thermiquement et que les grains se trouvant en cette zone sont nettement plus gros que ceux se trouvant dans la zone du métal de base. On peut le déduire en comparant les figures correspondantes aux différentes zones et pour le X52 et le X60. Certains éléments chimiques en solution solide peuvent se regrouper sous la forme d'inclusions non métalliques, ce qui justifie l'apparition de défauts structuraux. Ces inclusions, principalement des sulfures, oxydes, nitrures sont à l'origine de défauts internes et superficiels.

Quant à la zone fondue, on remarque l'apparition d'un grain basaltique, résultat typique d'une solidification rapide ; la microstructure de celle-ci représente des grains allongés d'austénite et de martensite tel que représenté sur la figure ci-dessous, on soupçonne aussi la possibilité de formation de la bainite.



a) MB

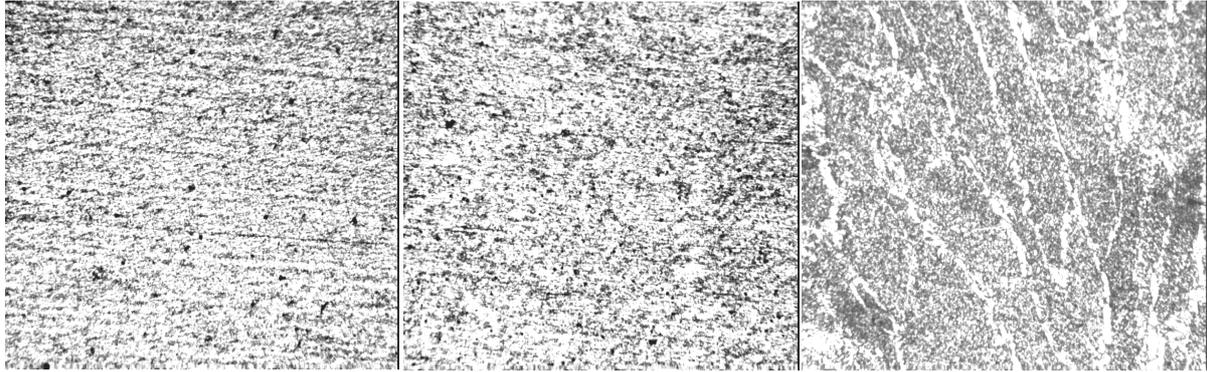
b) ZAT

c) ZF

**Figure III.2 :** Etat métallographique d'un cordon de soudure d'un acier X52

### III.2.2. Etat métallographique de l'acier X60

En ce qui concerne l'état métallographique du X60, on pourra dire la même chose que pour le X52 comme on le voit sur la figure III.3 à l'exception de la teneur de perlite et de ferrite. La perlite est nettement plus prépondérante que dans le X52.



a) MB

b) ZAT

d) ZF

**Figure III.3** : état métallographique d'un cordon de soudure d'un acier X60

Le diagramme de *Schaeffler-Delelong* qu'on observe sur la figure (III.4) nous indique qu'il y a possibilité quant à la formation de la martensite en utilisant la formule du chrome équivalent et du Nickel équivalent.

### III.2.3. Interprétations des résultats de l'étude métallographique

L'examen d'une section de soudure de l'acier X52, soudée au SAW H présente trois zones différentes :

(i) Le métal de base se compose des grains de ferrite et de perlite en tous les échantillons de notre étude.

(ii) La zone affectée par la chaleur produite par les températures maximales et les taux de refroidissement a montré une microstructure hétérogène située près de la ligne de fusion. Elle se compose de grains affinés de ferrite et de perlite, produits de la transformation du métal de base avec la chaleur fournie par le procédé de soudure ; la ferrite à grain grossier (secteurs foncés), la ferrite aciculaire (secteurs blancs), et de petites colonies de perlite (points blancs) aux joints de grains [13]. La largeur moyenne de la ZAT du X52 Brut est de **4 millimètres** comme on peut le déduire à partir des essais de micro-dureté aux quels on a procédé lors du PFE.

(ii) La structure de la zone fondue est hétérogène, elle est constituée d'une microstructure de solidification (structure basaltique) due au cycle thermique de soudure. Ceci se compose de grands grains colonnaires de ferrite orientés en direction de la ligne de soudure (secteurs foncés), mélange des phases de perlite et de ferrite aciculaire (secteurs blancs).

L'outil de prévision des transformations structurales dans la soudure des aciers est le diagramme *Schaeffler-Delelong* (figure III.4). Les formules de calcul de  $Cr_{\text{éq}}$  et  $Ni_{\text{éq}}$  ont été par la suite modifiées, et on a :

$$Cr_{eq} = \% Cr + 1.4 \% Mo + 1.5 \% Si + 0.5 \% Nb + 2 \% Ti, [11].$$

$$Ni_{eq} = \% Ni + 22 \% C + 0.31 \% Mn + 14.2 \% N + \% Cu, [12].$$

Le calcul de  $Cr_{eq}$  et du  $Ni_{eq}$  nous a donner les valeurs suivantes :

- Pour le X52

$$Cr_{eq} = 0,11$$

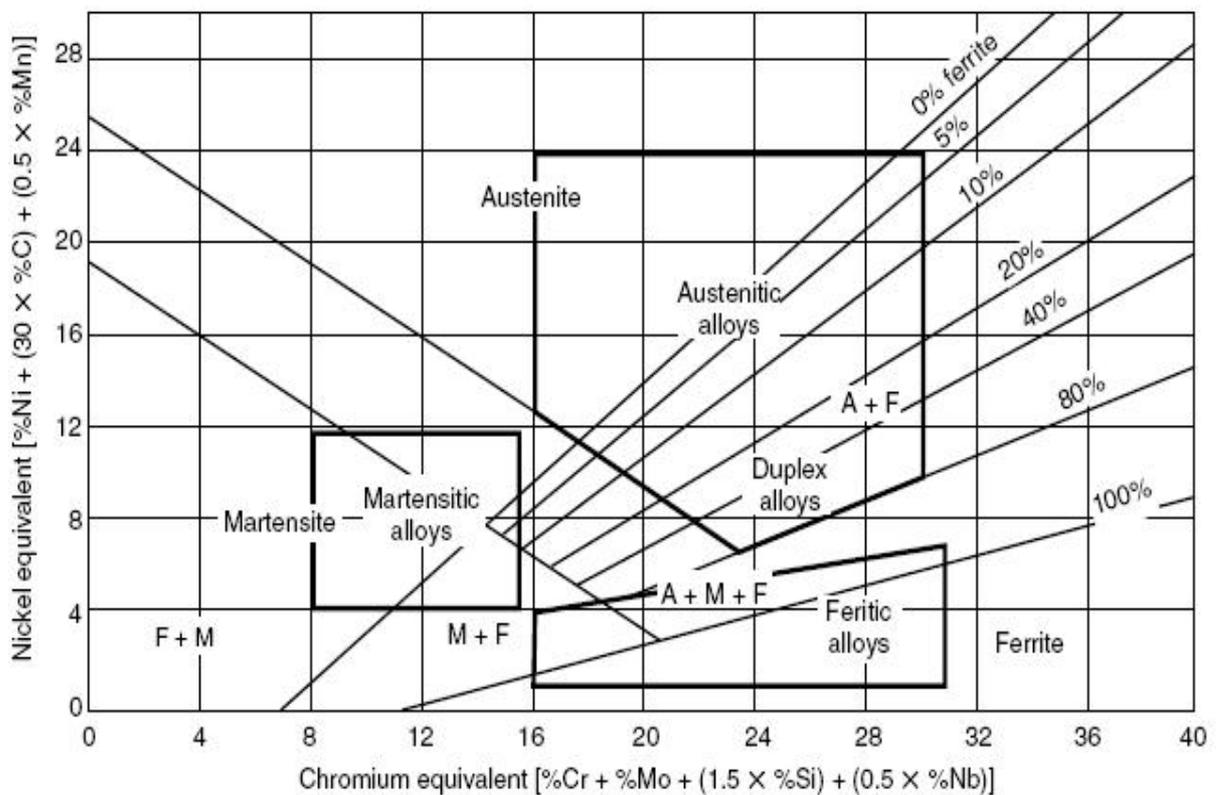
$$Ni_{eq} = 1,52$$

- Pour le X60

$$Cr_{eq} = 0,532$$

$$Ni_{eq} = 3,085$$

Si on projette les résultats obtenus on remarquera que les prévisions faites sont très plausibles.



*Figure III.4: diagramme de Schaeffler-Deelong.*

### III.3. Résultats des essais de résilience

Les essais de résilience ont pour but de déterminer la résistance du matériau aux chocs sans se rompre, ce risque est amplifié aux basses températures. Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (éprouvette sur deux appuis) ou Izod (éprouvette encastrée) et cela se fait selon une méthode normalisée permettant ainsi la possibilité de comparer les résultats pour chaque matériau.

L'essai mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester.

L'énergie absorbée par l'éprouvette ( $W$ ) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le début ( $W_0 = P \cdot h_0$ ) et l'arrivée ( $W_1 = P \cdot h_1$ ):  $W = P \cdot h_0 - P \cdot h_1 = P(h_0 - h_1)$

La résilience est égale au rapport de  $W$  sur l'aire de la section au droit de l'entaille.

#### III.3.1. Résilience de l'acier X52

Sur les tableaux ci-dessous la résilience de l'acier X52 est plus élevée dans la ZF qu'en ZAT qui est d'autant plus élevé que dans le métal de base, comme on peut le voir sur le tableau III.3.

*Tableau III.3 : résultats de l'essai de résilience pour le X52*

Position entaille	Dimension Eprouvette	Surface de L'entaille cm <sup>2</sup>	Travail J	Résilience J/cm <sup>2</sup>	Résilience Moyenne J/cm <sup>2</sup>
MA	55x10x7,5	0.60	<b>102</b>	<b>170</b>	<b>161.11</b>
	55x10x7,5	0.60	<b>90</b>	<b>150</b>	
	55x10x7,5	0.60	<b>98</b>	<b>163,33</b>	
MB	55x10x7,5	0.60	<b>105</b>	<b>175</b>	<b>169.44</b>
	55x10x7,5	0.60	<b>90</b>	<b>150</b>	
	55x10x7,5	0.60	<b>110</b>	<b>183,33</b>	
ZAT	55x10x7,5	0.60	<b>100</b>	<b>166,66</b>	<b>170.56</b>
	55x10x7,5	0.60	<b>101</b>	<b>168,33</b>	
	55x10x7,5	0.60	<b>106</b>	<b>176,66</b>	

La résilience de la ZAT est supérieure à celle du MB qui est supérieure à la résilience du MA. Ce phénomène s'explique par le fait que la ZAT subit un traitement thermique dû au soudage, cette zone est donc plus détendue que le MB. Quant au MA il subit une solidification et un refroidissement rapide, il est donc plus fragile.

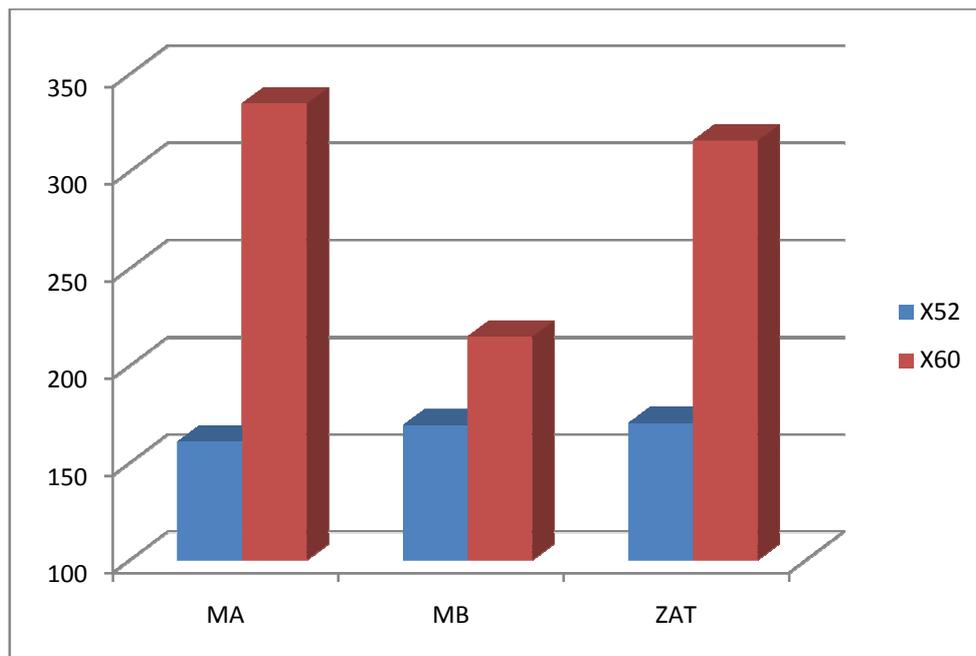
### III.3.2. Résilience de l'acier X60

Il à noter que la résilience de l'acier X60 est globalement plus importante que pour le X52 en gardant la même allure sauf pour le MA ou elle est nettement plus faible que celle enregistrer pou le X52. Comparer les résultats des tableaux III.3 et tableaux III.4.

*Tableau III.4 : résultats de l'essai de résilience pour le X60*

Position de l'échantillon	Dimension de l'éprouvette	Surface de l'entaille Cm <sup>2</sup>	Travail J	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne J/cm <sup>2</sup>
MB	55x10x10	0.80	280	350	335.00
	55x10x10	0.80	284	355	
	55x10x10	0.80	240	300	
MA	55x10x10	0.80	180	225	215.00
	55x10x10	0.80	176	220	
	55x10x10	0.80	160	200	
ZAT	55x10x10	0.80	250	312.5	315.83
	55x10x10	0.80	268	335	
	55x10x10	0.80	240	300	

On note que ces essais de résilience ont étaient fait à une température de 0°C, cette température est ainsi choisit afin d'approcher au mieux les températures de travaille de nos aciers. La figure suivante donne les résultats sous forme d'histogramme (figure III.5)



*Figure III.5 ; Histogramme de la résistance mécanique du X52 et X60.*

Pour le X60 la résilience de la ZAT est inférieure à celle du MB compte tenu des éléments d'alliage présents qui au contact de la chaleur dégagé lors du soudage vont se précipiter en durcissant la ZAT et par l'occasion va se fragiliser. De la même façon on pourra expliquer la fragilisation notable du MA.

On remarque que la résilience du X52 est relativement plus élevée que celle du X60, cependant elle est très faible au niveau du métal d'apport, au sein même du cordon, qui représente une zone cruciale pour la réalisation des tubes.

### III.4. Résultats de l'essai de traction

Lors de la caractérisation des matériaux on a souvent recours à une batterie de tests et de mesure, parmi ceci on a l'essai de traction qui nous permet de mesurer la limite élastique, la résistance à la rupture et le taux d'allongement. Dans les tableaux III.5, 7 on donne la moyenne de plusieurs essais réalisés sur des éprouvettes de X52 et de X60.

Ces essais sont faits sur des éprouvettes normalisées avant soudage ainsi que des éprouvettes avec cordon de soudure, les résultats figurent dans les tableaux III.6 et 8.

*Tableau III.5 : Essai de traction X52 non soudé*

Eprouvette	$E_{0,5\%}$ (MPa)	R (MPa)	A%
1	485	578	38
2	505,07	594,05	41,73
3	505	600	32
4	516	578	32
<b>Moyenne</b>	502,77	587,51	35,93

*Tableau III.6 : Essai de traction sur éprouvette X52 avec soudure*

Eprouvette	1	2	3	4	Moyenne (MPa)
<b>R</b>	602	596,85	640	594	608,21

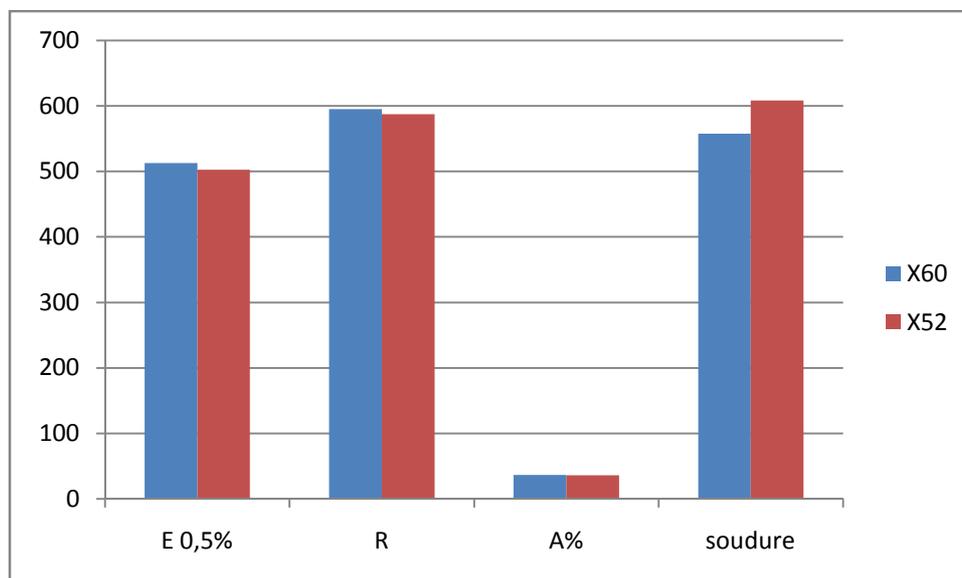
**Tableau III.7 : Essai de traction X60 non soudé.**

Eprouvette	E <sub>0,5%</sub>	R	A%
1	510	592	37
2	503	573	36
3	526	626	36
4	513	590	37,80
<b>Moyenne</b>	513	595,25	36,7

**Tableau III.8 : Essai de traction sur éprouvette X60 avec soudure.**

Eprouvette	1	2	3	4	Moyenne
<b>R</b>	542	546	595	544	557,75

L'histogramme figurant sur la figure III.6 résume l'essentielle des caractéristiques des deux nuances étudiées, le but est de comparer ces dernières.

**Figure III.6 ; Histogramme de la résistance mécanique du X52 et X60.**

On remarque aisément que la résistance mécanique du X60 est relativement supérieure à celle du X52, cela s'explique par l'influence des éléments d'addition. L'allongement est presque le même pour les deux nuances.

Par mesure de sécurité et conformément aux normes exigées, un essai de traction sur éprouvette contenant le cordon est réalisé, le but est de vérifier que la rupture se fait à

l'extérieur du cordon. On mesure dans ce cas aussi la résistance à la rupture ; les résultats ont montrés que la rupture se fait effectivement hors cordon et que la résistance est de l'ordre des essais sans soudure.

---

## **Conclusion**

Ce n'est que par une bonne caractérisation qu'on pourra détecter les éléments qui sont à l'origine des propriétés des matériaux et c'est de cette manière qu'on pourra porter des améliorations à ces derniers. Cette caractérisation nous permet aussi de bien choisir le bon matériau et la nuance adéquate aux contraintes de service.

Notre étude s'est penché sur la caractérisation des propriétés de deux nuances d'aciers, à savoir le API X52 et X60, en comparant entre les deux.

D'après l'analyse métallographique on a remarqué un structure ferritoperlitique très fine qui est à l'origine des propriétés mécaniques, cette structure est commune au deux nuances. On a trouvé, gras aux essais mécanique, que la ténacité et résistance du X60 sont supérieurs à celle du X52 alors que ce dernier possède une soudabilité relativement meilleure que le précédant à cause de sa composition chimique.

---

## Références bibliographiques

- [1] J. BINARD, Réservoirs, Soudage en chaudronnerie, Article dans Techniques de l'Ingénieur, Réf a683, 10 novembre 1985
- [2] J-P MUZEAU, Constructions métalliques – Assemblages par soudage, Article dans Techniques de l'Ingénieur, Réf c2522, 10 août 2012
- [4] Michal F. Ashby. Choix des matériaux en construction mécanique. DUNOD 1997.
- [5] A. MICHEL, Pièces mécaniques soudées – Matériaux, Article dans Techniques de l'Ingénieur, Réf bm5187, 10 juillet 2006
- [6] Blondeau REGIS « métallurgie et mécanique du soudage » ed. Lavoisier, Paris Hermès Sciences Publication, 2001.
- [7] Base métallurgique de soudage
- [8] J. Philibert, A. Vignes, Yves Bréchet, P. Combrade, Métallurgie du minerai au matériau 2<sup>e</sup> édition, DUNOD 2002
- [9] Préchauffage et post chauffage en construction soudée : *F. Guyot*. Institut Belge de la Soudure.
- [10] M. Colombié et al., Matériaux Métalliques, 2<sup>ème</sup> édition, DUNOD 2008
- [11]. d'après H. Berns, W. Theisen, in Ferrous Materials—Steel and Cast Iron (Springer, Berlin, 2008), pp. 47 & 322.
- [12]. d'après O. Hammar, U. Svensson, in Solidification and Casting of Metals (London, The Metals Society, 1979), pp 401–410
- [13]. J.M Gray. And Poutremoli. M, metallurgical options for API grad X70 and X80 linepipe in international conference. Pipe technology. Rome. PP 171-191. 1987.