

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة غرداية
Université de Ghardaïa



N°d'enregistrement

/.../.../.../.../...

كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهروميكانيك
Département Automatique et électromécanique

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et de la Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

Effet d'entaille en fatigue dans le joint soudé

Déposer le / 06 / 2022

Par:

- KOUTA Abderazzak

- DOUNIT Farouk

Devant le jury composé de :

Dr. AKERMI Fouzi	MCB	Président	Univ. Ghardaïa
Dr. BENDAOU Messaoud	MAA	Encadreur	Univ. Ghardaïa
Dr. MERZOUG Hocine	MAA	Examineur	Univ. Ghardaïa

Année universitaire : 2022/2023

Remerciement :

***قال رسول الله صلى الله عليه وسلم "من لم يشكر الناس لم يشكر الله"
صدق رسول الله صلى الله عليه وسلم***

Avant tout nous remercions « ALLAH » de nous avoir donné le courage ainsi que la force pour pouvoir achever ce modeste travail.

Nous tenons plus particulièrement à remercier, très chaleureusement notre encadreur Dr. BENDAOUI Messaoud

On tient à remercier également le président et les membres de jury de notre soutenance qui n'ont pas hésités pour examiner le contenu de cet ouvrage.

Nous remercions particulièrement nos professeurs, le personnel académique et le personnel de l'Université de Ghardaïa,

Nous remercions également notre famille d'avoir été à nos côtés tout au long du parcours scolaire

On remercie également toute l'équipe d'ALFAPIPE GHARDAIA et les intervenants professionnels responsables de notre formation.

Merci à vous tous.

Dédicace

Ce travail ne l'aurait pas éclairé sans l'aide de Dieu qui est capable de me donner la santé, le courage, la patience, la volonté et la force pour affronter toutes les difficultés et les obstacles de mon cheminement d'études.

Je remercie ma chère mère qui m'a donné tant de courage pour ma réussite. Mon cher père, qui a été un modèle pour moi dans ma vie, Je remercie tous les membres de ma famille (frères, sœurs, oncle et grands-parents)

Je tiens également à remercier mes amis, collègues de l'université pour leur patience et leur soutien tout au long des périodes d'études.

*Abderazzak
KOUTA*

Dédicace

Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

Nos parents d'avoir été à nos côtés tout au long du parcours scolaire

Toutes nos familles.

Tous nos amis, camarades sans exception

*Farouk
DOUNIT*

Résumé

Les systèmes de pipelines sont utilisés comme la solution la plus économique pour le transport des fluides utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière. Le processus de fabrication majeur représentant la période écoulée depuis la production des pipelines jusqu'à l'installation de service est le soudage. La zone de soudure représente la zone la plus critique en termes de propriétés des matériaux dans les composants de pipeline respectifs. En plus de la méthode de soudage choisie, la sélection du matériau en acier et des consommables de soudage appropriés pour le matériau sélectionné revêt une importance significative. Aujourd'hui, la plupart des conduites sont fabriquées selon les normes API.

La présence d'une concentration de contrainte liée à la géométrie de la soudure au niveau de la base du cordon a un impact significatif sur la durée de vie en fatigue des joints soudés. Les zones où les fissures commencent à se former se situent généralement soit à proximité de cette imperfection géométrique du cordon, soit en raison d'un défaut interne tel qu'un manque de pénétration ou des soufflures, ou d'un défaut externe tel que des caniveaux ou des inclusions de laitier, voire même de défauts macro-géométriques tels qu'une entaille.

Notre travail est axé sur l'étude et l'évaluation des propriétés et de la résistance des matériaux utilisés dans la fabrication des pipelines par des essais mécaniques (analyse chimique, dureté, flexibilité, traction et flexion) que nous effectuons dans le laboratoire d'essais mécaniques. Ces essais visent à déterminer son comportement face à différentes charges et pressions.

Mots clés : soudage- norme API- pipelines- acier- fatigue- contraint.

ملخص

تُستخدم أنظمة خطوط الانابيب باعتبارها الحل الأمثل اقتصاداً لنقل السوائل المستخدمة في صناعة النفط والغاز عملية التصنيع الرئيسية التي تمثل الفترة من إنتاج الانابيب الى تركيب الخدمة هي اللحام. تمثل منطقة اللحام المنطقة الأكثر أهمية من حيث خصائص المواد في مكونات خط الانابيب المعنية. بالإضافة الى طريقة اللحام المختارة. فان اختيار المواد الفولاذية المناسبة ومستهلكات اللحام للمواد المختارة له أهمية كبيرة. اليوم يتم تصنيع معظم الانابيب وفقاً لمعايير API.

يتأثر عمر التعب للتوصيلات الملحومة بشكل كبير بوجود تركيز للتوتر في قاعدة الحام الناجم عن هندسة اللحام. مناطق بداية التشقق تتوافق إما مع هذا العيب الهندسي في اللحام أو مع عيوب داخلية (نقص في الاختراق أو فراغات) أو خارجية (تجاويف أو احتواء الشوائب) أو عيوب ماكرو هندسية (شق).

يتركز عملنا في دراسة وتقييم خصائص ومقاومة المواد المستخدمة في تصنيع الانابيب من خلال اختبارات ميكانيكية وهي (التحليل الكيميائي الصلابة، المرونة، الشد، الانحناء)، نقوم بها في مختبر الاختبار الميكانيكي. وتهدف هذه الاختبارات الى تحديد سلوكها في مواجهة الاحمال والضغط المختلفة.

الكلمات المفتاحية: الحام - معيار API - الانابيب - المعدن - التعب - الاجهاد.

Abstract

Pipeline systems are used as the most economical solution for transporting fluids in the oil and gas industry. The major manufacturing process, spanning from pipe production to installation, is welding. The weld zone represents the most critical area in terms of material properties in the respective pipeline components. In addition to the chosen welding method, the selection of suitable steel material and welding consumables for the chosen material is of significant importance. Today, most pipelines are manufactured according to API standards.

The fatigue life of welded joints is strongly influenced by the presence of stress concentration at the weld toe due to the welding geometry. The crack initiation sites are associated either with this geometric feature of the weld or with internal (lack of penetration, blowholes) or external defects (grooves, slag inclusions) or macro-geometric defects (notches).

Our work focuses on studying and evaluating the properties and strength of materials used in pipeline fabrication through mechanical testing (chemical analysis, hardness, flexibility, tensile, and bending tests) performed in the mechanical testing laboratory. These tests aim to determine the material's behavior under different loads and pressures.

Key words: Welding- API 5L standard- pipelines- steel- fatigue-stra.

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Dédicace

Résumé

Table des matières	I
Liste de Figures	IV
Titre de Tableaux	VI
Liste des symboles	VII
Introduction Générale	IX

Chapitre I : L'état de la mécanique de la rupture

I.1 Introduction	1
I.2 Mécanique de la rupture élastique linéaire	1
I.2.1 Types élémentaires de rupture	1
I.2.2 Modes de rupture	3
I.2.3 Approche d'Irwin	3
I.2.4 Distribution des contraintes en fond de fissure	4
I.2.5 Relation entre le facteur d'intensité de contrainte K et l'énergie de Griffith G	6
I.2.6 Méthodes de calcul du facteur d'intensité de contraintes	7
I.2.6.1 La méthode du principe de superposition.....	7
I.2.6.2 La méthode d'extrapolation des déplacements	7
I.2.6.3 La méthode de collocation de frontière	8
I.2.6.4 La méthode des éléments finis	8
I.3 Mécanique de la rupture élastique-plastique	10
I.3.1 Modèles de Dugdale-Barenblatt	10
I.3.2 Intégrale de Rice	11
I.4 Ouverture en front de fissure (CTOD) (Crack Tip Opening Displacement).....	12
I.5 Duré de vie des assemblages soudent	13
I.6 Conclusion	14

Chapitre II : La notion d'effet d'entaille sur le joint soudé

II.1 Introduction.....	15
II.2 Concept d'effet d'entaille	15
II.3 Facteur de concentration de contrainte	17

II.4 Coefficient de réduction de la résistance en fatigue K_f (fatigue notch factor)	18
II.5 Coefficient de sensibilité à l'entaille (q)	19
II.6 Influence de la sévérité d'entaille	20
II.7 Conclusion	22

Chapitre III : Paramètres influençant sur les joints soudés

III.1 Introduction	23
III.2 Paramètres géométriques d'un joint soudé	23
III.2.1 Définition du soudage	23
III.2.2 Préparation de joint	24
III.2.3 L'ouverture de joint	25
III.2.4 L'angle de biseautage	25
III.3 L'effet de l'épaisseur sur la ténacité	25
III.3.1 Concept	25
III.3.2 La qualité du métal soudé	26
III.3.3 Procédé de soudage utilisé	26
III.3.4 Contrôle de la température	27
III.4 Influence de la forme et de la géométrie du joint soudé	28
III.4.1 Concept	28
III.4.2 Chan freinage	29
III.4.3 Ebavurage	29
III.4.4 Mise à niveau	29
III.4.5 Nettoyage	29
III.4.6 L'ouverture de joint	30
III.4.7 L'angle de biseautage	30
III.4.8 Exemples de Défaut	30
III.5 Conclusion	31

Chapitre IV - étude expérimentale

IV.1 Introduction	32
IV.2 Etudes des matériaux	32
IV.2.1 Essais statique	34
IV.2.1.1 Essais de Créer l'entaille (traction)	34
IV.2.1.2 Essai de traction pour deux échantillons d'épaisseurs différentes	35

IV.2.2 Essais métallurgiques	36
IV.2.2.1 Essais de dureté	36
IV.2.2.1.1 Généralités	36
IV.2.2.1.2 Essais Vickers	36
IV.3 Essai de traction	38
IV.4 Essai de pliage	41
IV.5 Résultat et Discussions	43
IV.5.1 Analyse chimique	43
IV.5.2 Essais statique	45
IV.5.2.1 Essais de Créer l'entaille transversale et longitudinale	45
IV.5.2.2 Essais de traction pour deux échantillons d'épaisseurs différentes	53
IV.5.3 Essais métallurgiques	54
IV.5.3.1 Essais de dureté	54
IV.5.4 Essai de traction	56
IV.5.5 Essai de pliage	58
IV.6 Conclusion	59
Conclusion générale	60
Références	62

Liste de Figures

Chapitre I

Fig. I.1 : Exemple de rupture fragile	2
Fig. I.2 : Exemple de rupture ductile	2
Fig. I.3 : Représentation schématique des trois modes de rupture.....	3
Fig. I.4 : Forme de la zone plastique selon l'analyse d'Irwin	4
Fig. I.5 : Contraintes en un point près de l'extrémité d'une fissure	5
Fig. I.6 : Diagramme bi-logarithmique de la distribution des contraintes au fond d'une fissure	6
Fig. I.7 : Fissure sollicitée en mode I	6
Fig. I.8 : (a) élément iso paramétrique à 8 nœuds dans le repère local	9
(b) élément iso paramétrique à 8 nœuds dans le repère global	9
(c) élément triangulaire formé par l'effondrement des nœuds 4, 8,1 en seul point	9
Fig. I.9 : Modèle de Dugdale-Barenblatt	10
Fig. I.10 : Forme de la fissure ouverte dans le modèle de Dugdale	11
Fig. I.11 : Définition des grandeurs introduites dans l'intégrale de Rice	12
Fig. I.12 : Emoussement de la fissure	13

Chapitre II

Fig. II.1 : champ de contrainte dans une éprouvette entaillée sollicitée en traction	16
Fig. II.2 : Effet d'entaille	16
Fig. II.3 : Similarité entre une plaque entaillée et un joint soudé	17
Fig. II.4 : Effet d'entaille sur le comportement en fatigue en flexion rotative	19
Fig. II.5 : Coefficient effectif de concentration de contraintes K_f en fonction du rayon en fond de l'entaille (Dowling 2007)	21
Fig. II.6 : Variation du rapport K_f/K_t en fonction du rayon r en fond d'entaille (Lieurade & Lu)	22

Chapitre III

Fig. III.1 : Cordon de la soudure	23
Fig. III.2 : Préparations bout à bout en X	24
Fig. III.3 : Schéma de la technique de soudage	27
Fig. III.4 : Température de préchauffage selon le carbone équivalent et l'épaisseur soudée ...	28
Fig. III.5 : Anomalies de souderas	30

Chapitre IV

Fig. IV.1 : Domaines d'utilisation des L'acier API 5L X70	33
Fig. IV.2 : SPECTROMAXx à émission optique utilisé pour l'analyse chimique	33
Fig. IV.3 : L'entaille transversale et longitudinale	35

Liste de figures

Fig. IV.4 : Les deux échantillons d'épaisseurs différentes	35
Fig. IV.5 : Principe de l'essai Vickers	37
Fig. IV.6 : Variation de dureté Vickers dans les trois zones	38
Fig. IV.7 : L'essai de dureté a été effectué sur l'échantillon	38
Fig. IV.8 : Appareil de micro dureté	38
Fig. IV.9 : échantillon après traction	39
Fig. IV.10 : machine de traction	40
Fig. IV.11 : Diagramme de traction	40
Fig. IV.12 : Modélisation d'un essai de flexion trois points	41
Fig. IV.13 : machine de pliage	42
Fig. IV.14 : Essai de pliage	42
Fig. IV.15 : L'échantillon après le test d'analyse chimique	44
Fig. IV.16 : la courbe de traction transversale et longitudinale	45
Fig. IV.17 : Résultats de l'essai de traction (l'entaille transversale et longitudinale).....	47
Fig. IV.18 : K_t en fonction de b/a pour l'entaille transversale	48
Fig. IV.19 : K_t en fonction de b/a pour l'entaille longitudinale	49
Fig. IV.20 : Comparaison entre les facteurs de concentration de contraintes K_t des éprouvettes de différents forme d'entaille (transversale et longitudinale).....	50
Fig. IV.21 : Variation de facteur d'intensité de contrainte (KI) en fonction de Taille de la fissure a (mm) pour l'entaille transversale	51
Fig. IV.22 : Variation de facteur d'intensité de contrainte (KI) en fonction de Taille de la fissure a (mm) pour l'entaille longitudinale	52
Fig. IV.23 : la courbe de traction pour deux échantillons d'épaisseurs différentes	53
Fig. IV. 24 : Eprouvettes avec joint de soudure bout à bout pour la dureté Vickers (Acier X70)	54
Fig. IV.25 : la courbe dureté sur un échantillon	55
Fig. IV.26 : la courbe de traction	56
Fig. IV.27 : Essai de traction sur soudure	58
Fig. IV.28 : Exemple de fissure après le pliage	58
Fig. IV.29 : Essais de pliage (Aucune fissure après le pliage)	58

N°	Titre de Tableaux	page
IV.1	Caractéristiques mécaniques de l'X70 selon l'API5L	34
IV.2	Resultants de l'analyse chimique	43
IV.3	Composition chimique X70 la norme API 5 L	44
IV.4	Résultat Essai traction (transversale et longitudinale)	45
IV.5	Les normes essai de traction API 5L X70	46
IV.6	Facteurs de concentration de contraintes (K_t) de l'entaille transversale	48
IV.7	Facteurs de concentration de contraintes (K_t) de l'entaille longitudinale	49
IV.8	Facteur d'intensité de contrainte (K_I) pour l'entaille transversale	51
IV.9	Facteur d'intensité de contrainte (K_I) pour l'entaille longitudinale	52
IV.10	Résultat d'essai de deux échantillons d'épaisseurs différentes	53
IV.11	Résultat de l'essai La dureté	55
IV.12	Résultat Essai traction sur la machine ALFAPIPE	57
IV.13	Les normes essai de traction API 5L	57

Liste des symboles

σ_{yy}	Contrainte d'ouverture
K_I	Facteur d'intensité de contrainte
σ_{ij}	Contrainte associée aux directions
f_{ij}	Une fonction adimensionnelle, dépendante du mode de chargement et de la géométrie de la pièce.
θ, r	Les coordonnées cylindriques relatives à la pointe de la fissure
σ_N	Contrainte nominale
G	L'énergie de Griffith
KI	Facteur d'intensité de contrainte de mode I
E	Module de Young
α	Exposant de la singularité de la contrainte
ν	Coefficient de poisson
μ	Coefficient de lamé
N_i	Fonction de forme correspondant au nœud i
(ξ, η)	Coordonnées du nœud dans le repère local
x_i	Coordonnées cartésiennes
σ_∞	Charge appliquée
R_p	Zone de la taille plastique
J	Intégrale de Rice
ρ	La masse volumique
Γ	contour ouvert
w	La densité massique d'énergie élastique
δ	Crack tip opening displacement, CTOD
d_n	Coefficient de proportionnalité sans dimension
σ_0	Limite d'élasticité

Liste des symboles

n	Coefficient d'érouissage
σ_{max}	Contrainte nominale maximale
σ_{min}	Contrainte nominale minimale
K_t	Facteur de concentration de contrainte plastique
K_σ	Facteur de concentration de contrainte élasto-plastique
K_f	Coefficient de réduction de la résistance en fatigue
q	Coefficient de sensibilité à l'entaille
ZF	Le zone fondue (Métal fondu)
ZAT	La zone affectée thermiquement
MB	Le métal de base
ZL	Le zone de liaison
Re	la limite d'élasticité.
Rm	la résistance à la traction.
A%	le pourcentage d'allongement après rupture
a_0	Epaisseur de l'éprouvette
b_0	Largeur de partie étroite
S_0	La section de partie étroite
a	Taille de la fissure
b	Largeur de l'entaille
a_c	Taille de la fissure critique
b_c	Largeur de l'entaille critique
S.A.W	Submerged Arc Welding
API	American Pétroleur Institute

Introduction Générale :

Dans le cas des pipelines fabriqués par "ALFAPIPE GHARDAÏA", il est essentiel de comprendre et d'évaluer l'effet d'entaille en fatigue sur les joints soudés. Cela permettra d'identifier les zones de préoccupations et de développer des stratégies d'amélioration de la durée de vie des pipelines.

Cette étude se concentrera sur plusieurs aspects clés. Tout d'abord, nous examinerons l'état actuel de la mécanique de la rupture, en mettant l'accent sur la mécanique de la rupture élastique linéaire et élastique-plastique. Nous étudierons également l'ouverture en front de fissure, mesurée par le déplacement d'ouverture de pointe de fissure (CTOD), qui fournit des informations cruciales sur la propagation des fissures dans les joints soudés.

Ensuite, nous aborderons la notion d'effet d'entaille, en mettant en évidence les différentes causes possibles et leur impact sur la résistance à la fatigue des joints soudés. Nous examinerons les facteurs métallurgiques, mécaniques et liés aux conditions de service qui peuvent entraîner la formation d'entailles dans les joints soudés des pipelines.

Par la suite, nous analyserons les paramètres influençant les joints soudés, tels que les paramètres géométriques, l'épaisseur et la forme du joint, et des exigences de qualité technique de soudage sont utilisés. Comprendre ces paramètres est essentiel pour évaluer la résistance à la fatigue des joints soudés et identifier les zones critiques nécessitant une attention particulière.

Enfin, nous présenterons une étude expérimentale comprenant des essais de matériaux, des essais statiques, des essais métallurgiques et des essais de fatigue. Que nous étudierons plus tard sur les différentes zones de soudage (MB, ZAT, ZF) Les résultats obtenus permettront d'évaluer la performance des joints soudés dans les pipelines fabriqués par "ALFAPIPE GHARDAÏA" et d'engager des discussions approfondies sur les implications et les améliorations potentielles.

Chapitre I

L'état de la mécanique de la
rupture

I.1. Introduction :

La rupture de matériaux est importante dans la science des matériaux et en ingénierie. Lorsque l'homme devra faire face aussi longtemps qu'il construira des édifices ou fabriquera des structures. Le développement technologique et la connaissance de la mécanique de la rupture permettent aujourd'hui de trouver des solutions de mieux prévenir le risque de rupture. Avec La capacité portante d'une structure et sa durée de vie y'a est fortement ce liées. Ce premier chapitre a pour objectif de présenter les notions essentielles de la rupture et les critères de propagation de fissures adaptés aux matériaux [1

Il est important de noter que toutes les pièces mécaniques peuvent contenir des fissures, même si elles ne sont pas visibles à l'œil nu. Ces fissures peuvent se développer lentement au fil du temps ou se propager brusquement, ce qui entraîne une rupture complète de la pièce. La capacité à prévoir et à anticiper ces phénomènes est essentielle pour le dimensionnement des structures.

De nos jours, la mécanique de la rupture joue un rôle crucial dans la prédiction des fissures causées par des défauts tels que les inclusions et les microfissures dans les matériaux. Elle permet également d'étudier la propagation de ces fissures au sein de structures simples ou complexes. [2].

I.2. Mécanique de la rupture élastique linéaire [3] :

Dans l'hypothèse élastique linéaire, la mécanique linéaire de la rupture (M.L.R) permet de caractériser le comportement d'un matériau vis-à-vis d'une sollicitation, en présence d'une fissure. Les rappels qui vont suivre résument les différentes approches qui sont utilisées soit en termes de bilan énergétique, soit en termes de concentration de contraintes. Ils permettent d'élaborer des critères de rupture, qui sont d'une importance fondamentale pour l'optimisation des matériaux et pour la prévision du comportement des pièces dans des conditions réelles d'emploi.

I.2.1. Types élémentaires de rupture [4] :

Dans un matériau homogène soumis à une contrainte uni-axiale, l'effort se transmet d'un atome à l'autre en suivant des lignes de force qui sont parallèles. Dans un matériau qui possède une fissure, les lignes de force doivent contourner cette fissure, ce qui conduit à une concentration de ces lignes au voisinage de la pointe de la fissure, d'où une concentration de la contrainte dans cette région, appelée tête ou pointe de fissure. On

observe deux types de rupture principaux suivant les mécanismes mis en jeu : une rupture fragile contrôlée par une contrainte normale, et une rupture ductile, précédée de déformations plastiques et contrôlée par les contraintes de cisaillement.

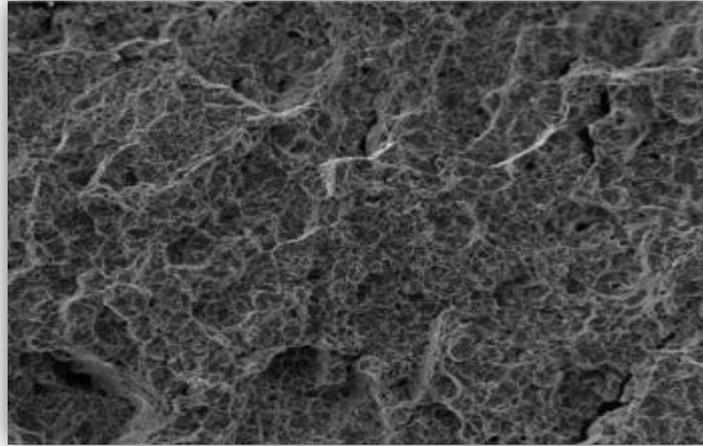


Fig. I.1 : Exemple de rupture fragile

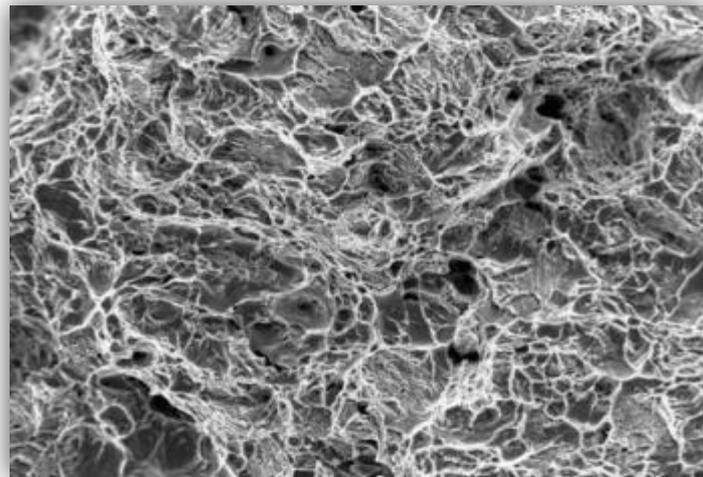


Fig. I.2 : Exemple de rupture ductile

Pour ces types de rupture, les déformations à rupture, l'énergie de rupture, les faciès de rupture sont différents. De même, les sollicitations extérieures imposées auront une influence sur le mode de rupture

- Rupture fragile : est caractérisée par l'absence de plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide des fissures avec faible consommation d'énergie. Dans le cas d'un cristal, la rupture est bien nette, elle suit des plans cristallographiques, on parle de rupture par clivage. Le matériau rompt avant d'avoir quitté le régime élastique, c'est le cas des céramiques

- La rupture ductile est principalement liée à la présence d'inclusions ou de précipités. Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est généralement significative, ce qui entraîne une consommation d'énergie importante.

I.2.2. Modes de rupture [5] :

Dans un premier temps, on présente l'approche locale en contrainte qui consiste à analyser le champ de contrainte près de la fissure. En fonction du type de chargement, on peut classer la sollicitation de la fissure en trois modes distincts. (fig. I.3) :

- Mode I : mode d'ouverture, la fissure se propage sous une contrainte de traction normale au plan de la fissure.
- Mode II : mode glissement plan, la fissure se propage sous une contrainte de cisaillement plan.
- Mode III : mode Cisaillement anti-plan, la fissure se propage sous une contrainte de cisaillement anti-plan.

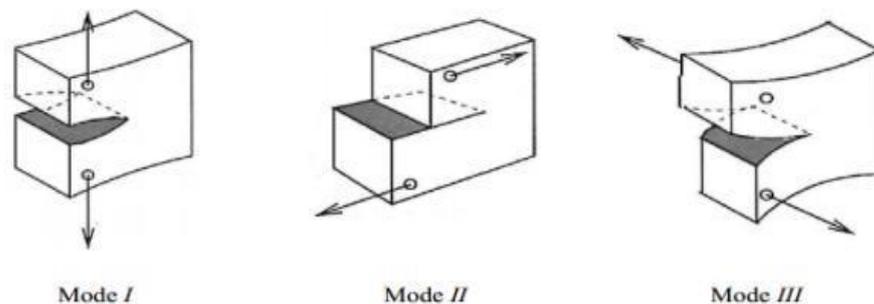


Fig. I.3 : Représentation schématique des trois modes de rupture

I.2.3. Approche d'Irwin [6] :

L'objectif de cette approche est de calculer le facteur d'intensité de contrainte en mode I, en prenant en compte la présence d'une petite zone plastique par rapport à la longueur de la fissure. Sur le plan de la fissure et en aval de son extrémité ($\theta=0$), la contrainte normale σ_{yy} dans un matériau soumis à une sollicitation en mode I est exprimée par

$$\sigma_{yy} = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}}$$

En première approximation, Irwin considère que la frontière entre les zones élastiques et plastiques correspond au point où les contraintes atteignent la limite d'élasticité du matériau. Pour déterminer le rayon r_y où cette frontière coupe le plan d'une fissure en contraintes planes, on fait l'hypothèse d'un comportement élastoplastique parfait du matériau. Cependant, cette analyse ne tient pas compte des forces non transmises représentées par l'aire hachurée dans la (fig.I.4). Afin de prendre en compte ces forces, il est nécessaire d'assurer l'équilibre entre les deux distributions de contraintes (élastique et élastoplastique).

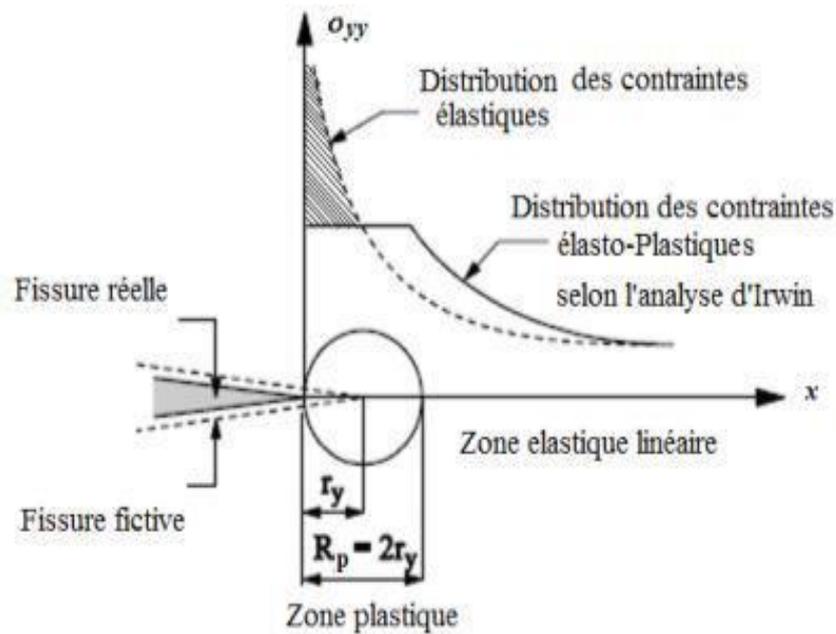


Fig. I.4 : Forme de la zone plastique selon l'analyse d'Irwin.

I.2.4. Distribution des contraintes en fond de fissure [6] :

IRWIN propose de décrire la distribution des contraintes admissibles au voisinage du front d'une fissure par la relation

$$\sigma_{ij} = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

Le facteur d'intensité de contraintes K_I représente l'amplitude de la distribution de contraintes. Les paramètres r et θ définis dans la (fig. I.5), correspondent aux coordonnées polaires de la zone mesurée à partir du fond d'entaille. Irwin démontre que la connaissance

seule du facteur d'intensité de contraintes permet de caractériser la répartition des contraintes près du fond de la fissure .

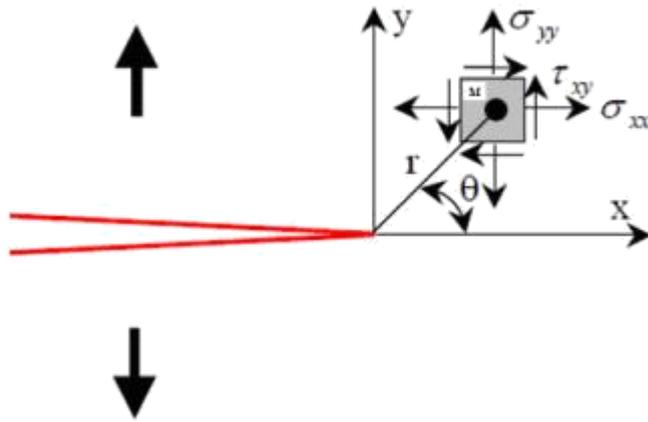


Fig. I.5 : Contraintes en un point près de l'extrémité d'une fissure

La (Fig. I.5) illustre de manière schématique les contraintes sur un élément centré sur un point 'M', défini par les coordonnées polaires r et θ par rapport à une extrémité d'une fissure soumise à un mode d'ouverture ou mode I. Le champ de contraintes est exprimé sous la forme suivante :

$$\sigma_{xx}(\theta) = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy}(\theta) = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{xy}(\theta) = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

La distribution des contraintes à la pointe de la fissure présente une singularité de la forme $r^{-\frac{1}{2}}$. Lorsque la distribution de contraintes σ_{yy} est représentée dans un diagramme bi-logarithmique (fig. I.6), normalisée par la contrainte nominale σ_N en fonction de la distance au fond de la fissure r normalisée par la taille du ligament b , on obtient une droite avec une pente $\alpha=0.5$. Le coefficient α correspond à l'exposant du terme singulier de la distribution des contraintes.

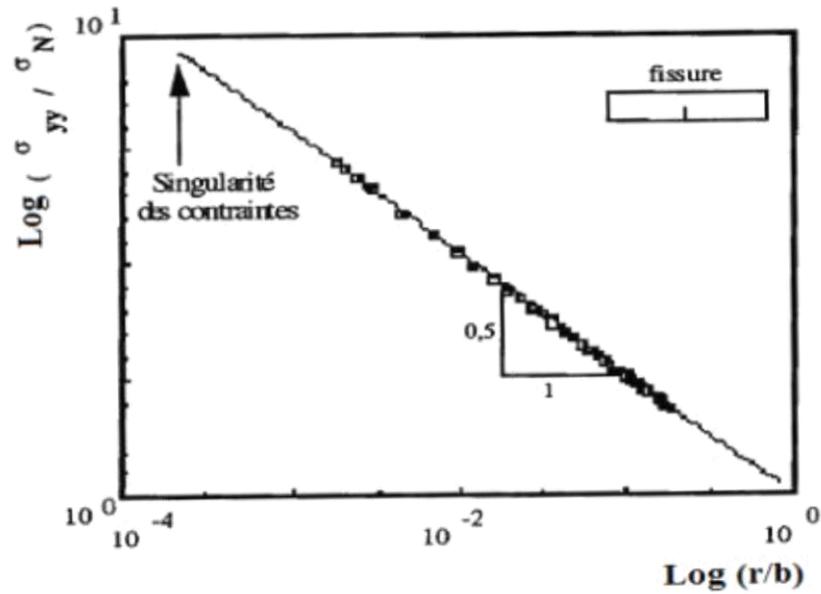


Fig. I.6 : Diagramme bi-logarithmique de la distribution des contraintes au fond d'une fissure

Le facteur d'intensité de contraintes est défini en fonction de la distribution de contraintes σ_{yy} par la relation suivante :

$$K_I = \sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{yy}(r, \theta) r^{\frac{1}{2}}$$

I.2.5. Relation entre le facteur d'intensité de contrainte K et l'énergie de Griffith G [1]:

Nous allons plus particulièrement étudier le cas d'une fissure élastique sollicitée en mode I (fig. I.7), puisque les situations en mode II et III se traitent de façon analogue

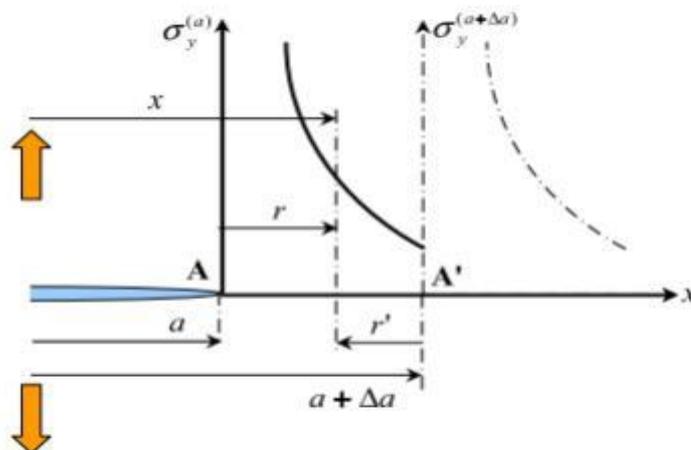


Fig. I.7 : Fissure sollicitée en mode I

Comme la fissure a pour longueur initiale « a » et se propage sur une distance Δa , son extrémité se déplace de la position $A(x = a)$ à la position $A'(x = a + \Delta a)$

Pour déterminer l'énergie de propagation de la fissure, appelée aussi taux de restitution d'énergie et notée G , il est plus pratique de calculer le travail de régression de la fissure de la position A' à la position A , autrement dit de considérer le travail nécessaire pour refermer les lèvres de la fissure. Notons enfin que la relation entre le facteur d'intensité de contrainte K et le taux de restitution d'énergie G s'écrit :

$$G = \alpha \cdot \frac{KI^2}{E}$$

Avec : $\alpha = 1$ en contraintes planes et $\alpha = 1 - \nu^2$ en déformations planes

I.2.6. Méthodes de calcul du facteur d'intensité de contraintes [7] :

Il existe plusieurs techniques pour calculer le facteur d'intensité des contraintes, parmi les plus utilisés, on peut citer :

- La méthode du principe de superposition.
- La méthode d'extrapolation des déplacements
- La méthode de collocation de frontière.
- La méthode des éléments finis.

I.2.6.1. La méthode du principe de superposition :

Cette méthode consiste à décomposer le problème posé en une somme de problèmes simples dont les solutions sont connues. Le problème étant un problème d'élasticité linéaire, on peut appliquer le principe de superposition. On a ainsi

$$K_I^{total} = K_I^A + K_I^B + K_I^C + \dots$$

I.2.6.2. La méthode d'extrapolation des déplacements :

Le saut de déplacement à travers les lèvres de la fissure pour les points $(r, \theta = +\pi)$ et $(r, \theta = -\pi)$ se calcule à partir d'équation suivante

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\Delta u_2 \cdot \mu}{k + 1} \sqrt{\frac{2\pi}{r}}$$

$$u_2 = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[K + 1 - 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$$

$$\Delta u_2 = u_2(\theta = +\pi) - u_2(\theta = -\pi)$$

$$K = 3 - 4\nu \text{ en deformation plane}$$

$$K = \frac{3-\nu}{1+\nu} \text{ en contrainte plane}$$

I.2.6.3. La méthode de collocation de frontière :

La méthode de collocation de frontière est l'une des méthodes de calcul du facteur d'intensité de contrainte à partir du développement asymptotique des champs des contraintes en point de fissure. L'idée générale est qu'étant donnée les conditions aux limites en contrainte pour un problème donné, on exprime les contraintes en un nombre fini de positions, appelées points de collocation, à l'aide de la forme asymptotique avec des coefficients inconnus

Pour chaque point de collocation, on obtient une équation pour les coefficients inconnus. Il suffit d'avoir au moins autant de points de collocation que de coefficients inconnus, afin de résoudre le système d'équations et obtenir les coefficients recherchés. La valeur du coefficient correspondant à la singularité de contrainte en $\frac{1}{\sqrt{r}}$ est le facteur d'intensité de contrainte

I.2.6.4. La méthode des éléments finis :

Toutes les méthodes de calcul des facteurs d'intensité de contrainte sont basées sur une détermination précise des champs de contraintes et de déplacements. Cependant, des résultats plus précis peuvent être obtenus en capturant la singularité du champ de contrainte à la pointe de la fissure. Étant donné que nous savons que dans les matériaux élastiques, les contraintes à la pointe de la fissure sont singulières et varient selon $\frac{1}{\sqrt{r}}$, cette singularité peut être incorporée dans les calculs des éléments finis.

Dans la méthode des éléments finis le champ de déplacement et les coordonnées sont interpolés à l'aide de fonction de forme.

Soit $x = x_1$, $y = x_2$, $u = u_1$, $v = u_2$. Considérons un élément iso paramétrique à 8 nœuds

Représenté dans la (fig. I.8(b)). En utilisant les fonctions de forme $N_i(\xi, \eta)$ correspondant au nœud i , de coordonnées nodales (x_i, y_i) dans le repère global et (ξ, η) dans le repère local

$$x = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) x_i$$

$$y = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) y_i$$

Les déplacements sont interpolés de la même manière :

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) u_i$$

$$v = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) v_i$$

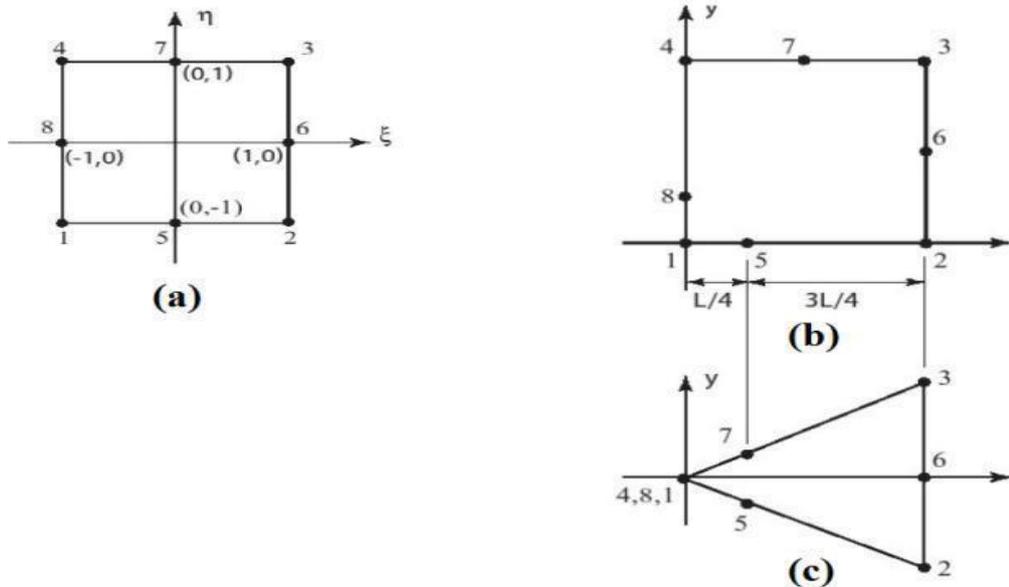


Fig. I.8 : (a) élément iso paramétrique à 8 nœuds dans le repère local,
 (b) élément iso paramétrique à 8 nœuds dans le repère global.
 (c) élément triangulaire formé par l'effondrement des nœuds 4, 8 en seul point

I.3. Mécanique de la rupture élastique-plastique [2] :

Dans de nombreuses situations d'exploitation impliquant des charges importantes, la plupart des matériaux d'ingénierie présentent un comportement élastique et inélastique non linéaire. Dans de tels cas, les hypothèses de la mécanique de rupture élastique linéaire peuvent être incohérentes ou inappropriées.

- La zone plastique au fond de la fissure peut être de taille similaire à celle de la fissure elle-même.
- La taille et la forme de la zone plastique peuvent varier à mesure que la charge appliquée augmente et que la fissure se propage.

C'est pourquoi une théorie plus générale est nécessaire pour les matériaux élasto-plastiques, qui peuvent connaître :

- Les conditions locales pour la croissance initiale de la fissure qui comprennent la nucléation, la croissance et la coalescence des vides (décohésion) au niveau d'un fond de fissure.
- Un critère de bilan énergétique global est utilisé pour évaluer la croissance supplémentaire de la fissure et la possibilité d'une rupture instable.

I.3.1. Modèles de Dugdale-Barenblatt [11] :

Ce modèle est basé sur le principe de superposition. Considérons une fissure de longueur $(2a)$ dans une plaque infinie soumise à une contrainte uniforme à l'infini notée σ_∞ . La plasticité est modélisée par des efforts égaux à la limite d'élasticité du matériau. Ces efforts constants s'exercent sur une longueur R_D , taille de la zone plastique à déterminer, devant chaque extrémité de la fissure (Fig. I.9).

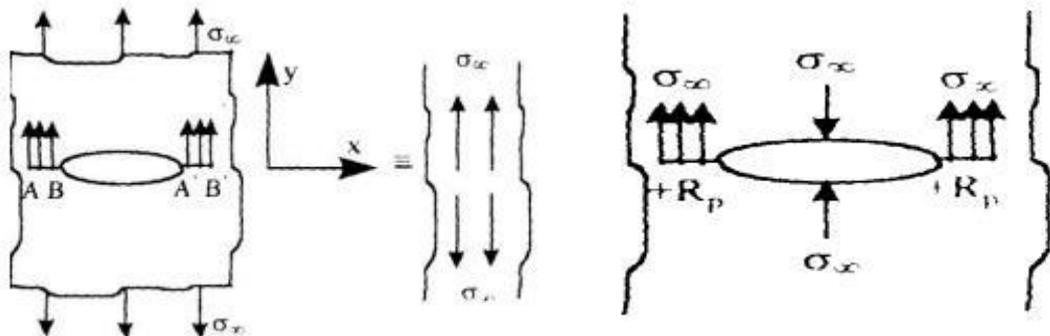


Fig. I.9 : Modèle de Dugdale-Barenblatt.

La fissure adopte, sous l'effet de l'équivalent de force de cohésion reliée à la plasticité, la forme particulière représentée en (fig. I.10).

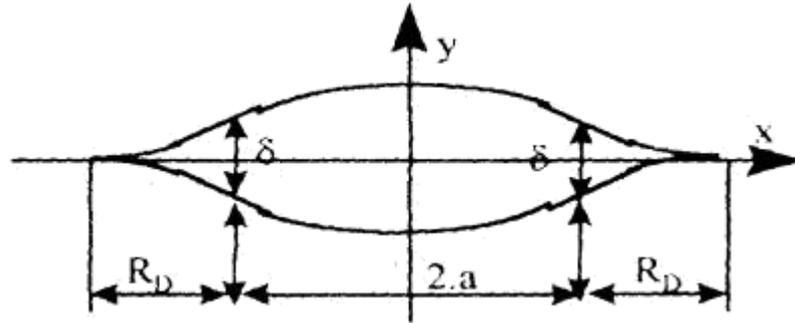


Fig. I.10 : Forme de la fissure ouverte dans le modèle de Dugdale

I.3.2. Intégrale de Rice [5] :

Le concept théorique de l'intégrale de Rice J a été initialement introduit par Eshelby (Eshelby, 1956) et développé par Cherepanov (Cherepanov, 1967) puis Rice (Rice, 1968). Cette intégrale curviligne est utilisée comme un outil mathématique pour estimer le taux de restitution d'énergie. L'intégrale de Rice permet de faire le lien entre l'approche mécanique basée sur les contraintes de Williams et l'approche énergétique de Griffith et ses développements ultérieurs. L'intégrale de Rice est exprimée par la formule suivante :

$$J = \int_{\Gamma} \left(\rho w n_1 - \sigma_{ik} \frac{du_i}{dx_1} n_k \right) ds$$

w est la densité massique d'énergie élastique, et ρ est la masse volumique. (Fig. I.11) L'équation est illustrée avec d'autres grandeurs introduites. Γ représente un contour ouvert orienté autour de la fissure, \vec{n} est la normale sortante du contour Γ et $d\mathbf{S}$ représente un élément de surface élémentaire sur le contour Γ . La direction \vec{x} est colinéaire à la fissure et Le contour se propage dans la direction \vec{n}_i

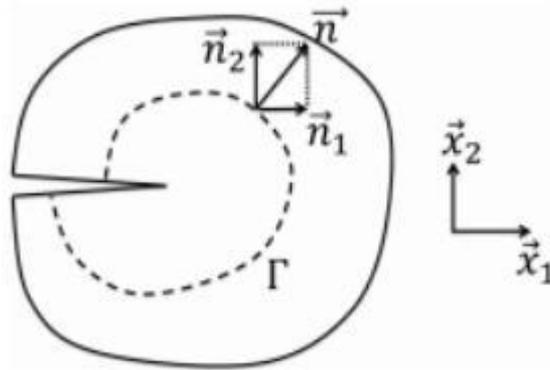


Fig. I.11 : Définition des grandeurs introduites dans l'intégrale de Rice

L'intégrale de Rice présente la propriété d'être indépendante du contour d'intégration Γ pour un corps élastique soumis à un champ de déformation bidimensionnel, et en l'absence de forces volumiques. Ainsi, elle peut être calculée aussi bien près de la fissure que sur un contour éloigné de celle-ci. Cette propriété permet d'obtenir une méthode pratique dans les simulations numériques utilisant la méthode des éléments finis. De plus, Budiansky et Rice ont démontré en 1973 que cette intégrale était équivalente au taux de restitution d'énergie lorsque la fissure se propage de manière rectiligne et que la charge appliquée est constante, soit :

$$\mathbf{J} = \mathbf{G}$$

La relation de l'intégrale de Rice offre une méthode simple et rapide pour calculer le taux de restitution d'énergie dans les matériaux élastiques, ce qui permet d'appliquer des critères de propagation des fissures. En raison de ses propriétés, l'intégrale de Rice est particulièrement utilisée en mécanique non linéaire de la rupture. Elle permet d'analyser le comportement des matériaux lors de la propagation des fissures et d'évaluer leur résistance à la rupture.

I.4. Ouverture en front de fissure (CTOD)(Crack Tip Opening Displacement) [9]:

Historiquement, le premier paramètre pour la détermination de la ténacité à la rupture dans la région élasto-plastique était le déplacement à l'ouverture de la fissure (CTOD) ou « L'ouverture au sommet de la fissure ». Ce paramètre a été déterminé par Wells au cours des études sur les aciers de construction qui, en raison de la ténacité élevée, n'ont pas pu être caractérisées avec le modèle de mécanique de rupture élastique linéaire.

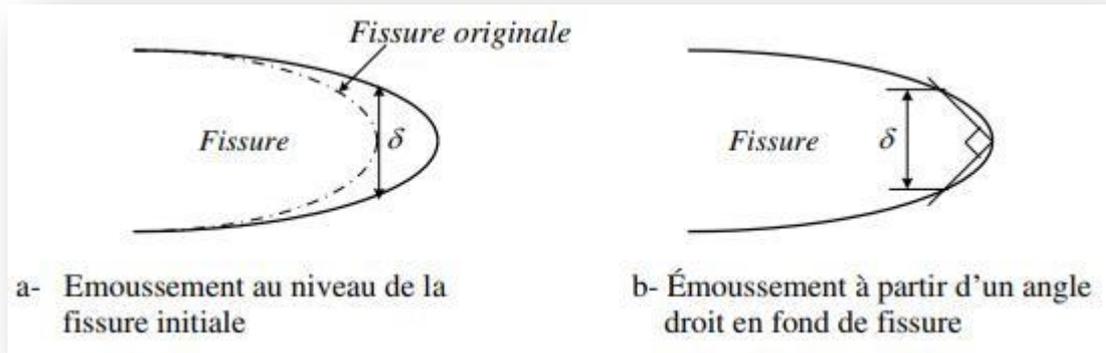


Fig. I.12 : Émoussement de la fissure

On peut relier le CTOD au taux de restitution d'énergie, ou encore à l'intégrale J en utilisant la solution asymptotique HRR :

$$\delta = d_n(\sigma_0, n) \frac{J}{\sigma_0}$$

Où d_n est un coefficient de proportionnalité sans dimension et qui dépend fortement du coefficient d'écroûissage n et de la limite d'élasticité σ_0

Il existe plusieurs définitions alternatives du CTOD (Critical Crack Tip Opening Displacement), la plus courante étant que le CTOD correspond au déplacement à la pointe de la fissure d'origine et à l'interception à 90° . Cette dernière définition, suggérée par Rice, est souvent utilisée pour déterminer le CTOD dans les modèles par éléments finis.

généralement, des mesures de CTOD en laboratoire sont effectuées sur des échantillons fendus en bordure et soumises à une flexion à trois points. Les premières expériences utilisaient une jauge plate en forme de palette insérée dans la fissure. Lorsque la fissure s'ouvrait, la jauge à aubes tournait et envoyait un signal électronique à un traceur x-y. Cependant, cette méthode était peu précise car il était difficile d'atteindre le fond de la fissure avec la jauge à aubes.

I.5. Duré de vie des assemblages soudent [10] :

Aucune méthode n'a été définie pour évaluer la durée de vie des assemblages soudés à partir des résultats sur des éprouvettes non soudées, en raison de plusieurs raisons : :

- Les formes des cordons de soudure ne sont pas suffisamment bien définies pour permettre une estimation précise des contraintes aux zones critiques, telles que les bords et la racine du cordon.
- Les contraintes résiduelles dans les assemblages soudés sont très élevées, atteignant même la limite d'élasticité du matériau, ce qui rend difficile le calcul de la contrainte moyenne.
- À l'instant de la rupture, le pourcentage du nombre de cycles d'amorçage par rapport au nombre de cycles total est plus faible pour les assemblages soudés.

Pour estimer la durée de vie des assemblages soudés, des essais sont réalisés sur des échantillons soudés. Cependant, ces essais doivent être effectués sur des assemblages représentatifs des structures étudiées, avec le même type de matériau et des conditions de réalisation comparables. Les essais de fatigue sur les assemblages soudés suivent les principes généraux des essais de fatigue. Après un certain nombre de cycles, relativement faible pour les assemblages soudés, une fissure apparaît dans une zone où l'effet d'entaille est maximal, telle que le bord ou la racine du cordon de soudure. En poursuivant l'essai, la fissure se propage. L'essai est arrêté lorsque l'éprouvette se rompt ou lorsque celle-ci ne supporte plus la charge nominale.

I.6. Conclusion :

- Nous concluons, Les fissures se trouvent généralement dans les pièces mécaniques, même si elles ne sont pas visibles à l'œil nu
- la propagation de la fissure en supposant que cette dernière se propage d'une manière linéaire, ce qui n'est pas toujours vrai dans la réalité.
- Chaque matériau avait un point faible connu par la fatigue (corrosion, fluage,.....)
- La rupture environnement rupture aléatoire, donc la prévention à partir de cette rupture ce n'est pas facile, il faut mettre beaucoup de précautions pour éviter tous les problèmes de rupture environnement

Chapitre II

La notion d'effet
d'entaille sur le joint soudé

II.1. Introduction :

Les fissures entraînent une répartition inégale de la charge, connue sous le nom d'effet d'entaille. Un impact d'entaille ou des pics de contrainte peuvent entraîner une défaillance prématurée. Par conséquent, son effet est généralement considéré comme négatif.

La durée de vie en fatigue des joints soudés est significativement affectée par la présence d'une concentration de contraintes dans la partie inférieure de la semelle associée à la géométrie de la soudure.

La résistance statique d'un joint soudé est généralement égale à celle du métal d'origine, mais la résistance à la fatigue est bien inférieure. Parmi les facteurs affectant la résistance à la fatigue des assemblages soudés, on trouve :

- Facteurs géométriques : forme du cordon, désalignement de la plaque, épaisseur de la plaque
- Facteurs métallurgiques : nature du métal de base, procédés de soudage, défauts de soudage, niveau de contraintes résiduelles
- Facteurs associés à la contrainte : modes de chargement (amplitude fixe ou variable, rapport de charge), gradient de contrainte, contraintes bi axiales, environnement.

II.2. Concept d'effet d'entaille :

Le terme < entaille > définit une discontinuité imposée ou accidentelle de la forme de la pièce ou une hétérogénéité du matériau. Les entailles peuvent avoir trois types de cause :

- Métallurgiques
- mécaniques
- de service (naissance au cours de l'utilisation)

En général, les discontinuités sont des trous, une rainure, etc. l'entaille correspond au pied de cordon ou un manque de pénétration. Ces discontinuités au pied à la modification du champ de contrainte. (Fig. II.1). L'effet d'une discontinuité géométrique dans un élément de structure chargé est d'intensifier la valeur de la contrainte nominale au voisinage de la discontinuité et de la contrainte locale [11].

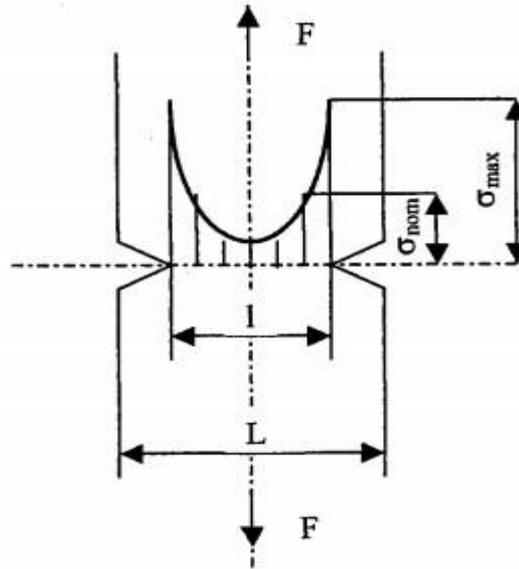


Fig. II.1 : champ de contrainte dans une éprouvette entaillée sollicitée en traction.

Les discontinuités dans une structure provoquent des modifications dans le champ de contrainte (Fig. II.2). L'effet d'une discontinuité géométrique dans un élément de structure soumis à une charge est d'augmenter la valeur de contrainte au niveau du fond de l'entaille [12].

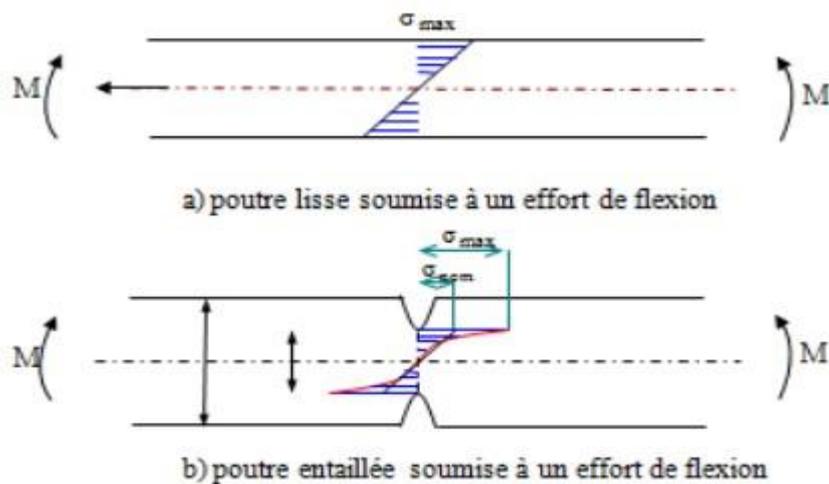


Fig. II.2 : Effet d'entaille

Dans ce mémoire, la fissure correspond au défaut de la soudure (Fig. II.3) [13].

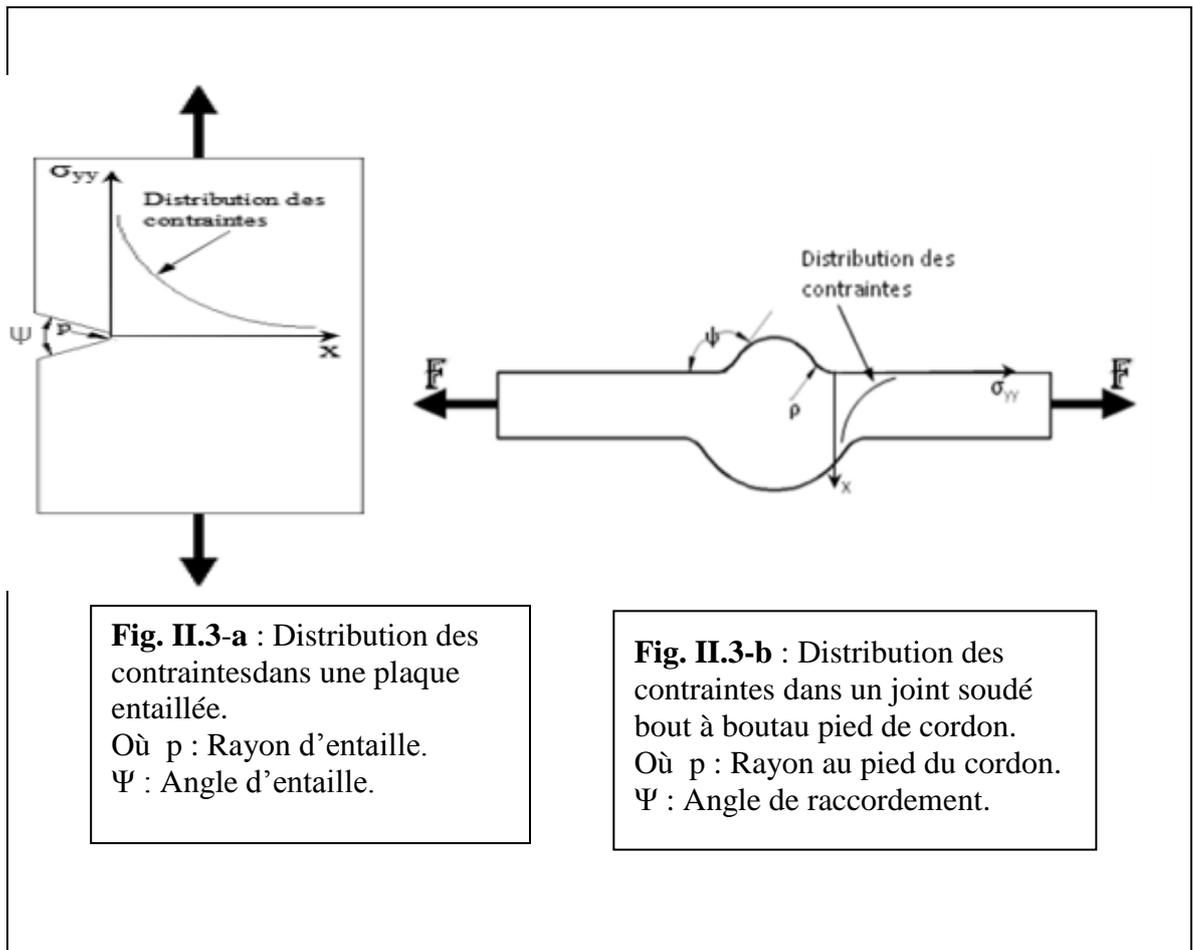


Fig. II.3 : Similarité entre une plaque entaillée et un joint soudé

II.3. Facteur de concentration de contrainte [13] :

Dans le domaine élastique, Peterson définit le facteur de concentration de contrainte de deux manières différentes :

- Le rapport de la contrainte maximale au fond d'entaille et la contrainte nominale s'écrit :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

- Le rapport de la contrainte maximale au fond d'entaille et la contrainte globale est :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_g}$$

On constate que ce facteur dépend de la géométrie locale de la pièce et du type de sollicitation.

Dans le domaine élastoplastique, le facteur de concentration de contrainte est défini par deux manières :

- a. par rapport à la contrainte nominale :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_L}{\sigma_{nom}}$$

- b. ou par rapport à la contrainte globale :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_L}{\sigma_g}$$

Où σ_L est la contrainte locale.

On constate que ce facteur ne dépend pas seulement de la géométrie locale de la pièce et du type de sollicitation, mais aussi de la nature du matériau

II.4. Coefficient de réduction de la résistance en fatigue K_f (fatigue notch factor) [14] :

Le coefficient de réduction de la résistance en fatigue est défini comme le rapport entre la limite d'endurance d'un échantillon lisse et celle d'un échantillon entaillé

$$K_f = \frac{\sigma_D}{\sigma_D^E}$$

Les deux résistances en fatigue sont considérées pour une même durée de vie et un même rapport de contrainte R. L'expérience démontre que le coefficient de réduction de résistance K_f est moins élevé que k_t , notamment pour les entailles sévères et les matériaux à faible résistance (Schijve, 1980). La Figure II.4 montre l'effet de l'entaille sur la courbe S-N d'un alliage 2024-T4 avec une éprouvette présentant un rayon de 0,25 mm au fond de l'entaille et soumise à une flexion rotative. La courbe en pointillés longs représente

la diminution de la résistance en fatigue d'une éprouvette entaillée, basée sur le facteur K_t . La courbe en pointillés courts représente la vraie réduction de la résistance en fatigue qui définit le facteur K_f

Pour des durées de vie jusqu'à 10^5 , l'écart entre les deux facteurs est plus important que pour des durées de vies supérieures à 10^6

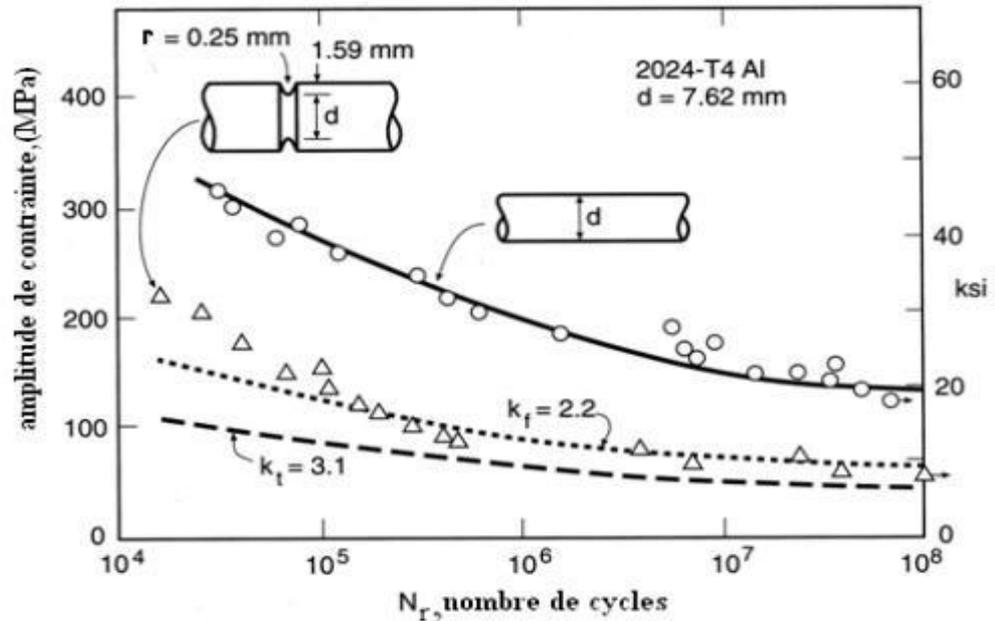


Fig. II.4 : Effet d'entaille sur le comportement en fatigue en flexion rotative

(Dowling, 2007)

les plusieurs paramètres de la valeur du facteur K_f :

- les propriétés mécaniques du matériau ;
- le type de chargement ;
- la grandeur et la géométrie de la pièce ;
- la durée de vie de la pièce (en nombre de cycles)
- la présence de défauts

II.5. Coefficient de sensibilité à l'entaille (q) [12] :

Pour le dimensionnement des pièces en fatigue, les bureaux d'études utilisent le concept de coefficient de sensibilité à l'entaille (q). défini par la formule suivante :

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1}$$

Les pièces étant dimensionnées en tenant compte d'une résistance illimitée en fatigue, ce qui associe la définition K_f et la limite d'endurance. Dans la littérature, des modèles anciens permettent de relier le rayon d'entaille, une caractéristique du matériau et le facteur de réduction en fatigue. Certains de ces modèles prennent en compte le gradient de contrainte induit à la fois par le mode de chargement et l'effet de l'entaille.

La valeur du coefficient de sensibilité (q) varie entre 0 et 1. S'il n'y a pas de sensibilité à l'effet d'entaille, sa valeur est 0 et $K_f = 1$.

Si $q=1$, alors $K_f = K_t$. Les matériaux ductiles, tels que les métaux, sont généralement peu sensibles à l'effet d'entaille. Une déformation plastique au niveau du fond de l'entaille permet de réduire l'amplitude de la contrainte locale. Les matériaux plus durs ne permettent pas cette plasticité au niveau du fond de l'entaille.

la sensibilité à l'effet d'entaille dépend aussi du gradient de contrainte en fond d'entaille. Selon (Schijve, 1980)

II.6. Influence de la sévérité d'entaille [14] :

Pour un matériau donné, l'écart entre les facteurs K_f et K_t est d'autant plus grand que l'entaille est sévère. La (fig. II.5) présente l'évolution des facteurs K_f et K_t en fonction du rayon en fond d'entaille, pour une éprouvette soumise à la flexion rotative, en acier au carbone AISI 1045 avec une résistance à la traction de 400 MPa. En modifiant le rayon, on change le degré de sévérité d'entaille. Plus le rayon est petit, plus l'entaille est sévère.

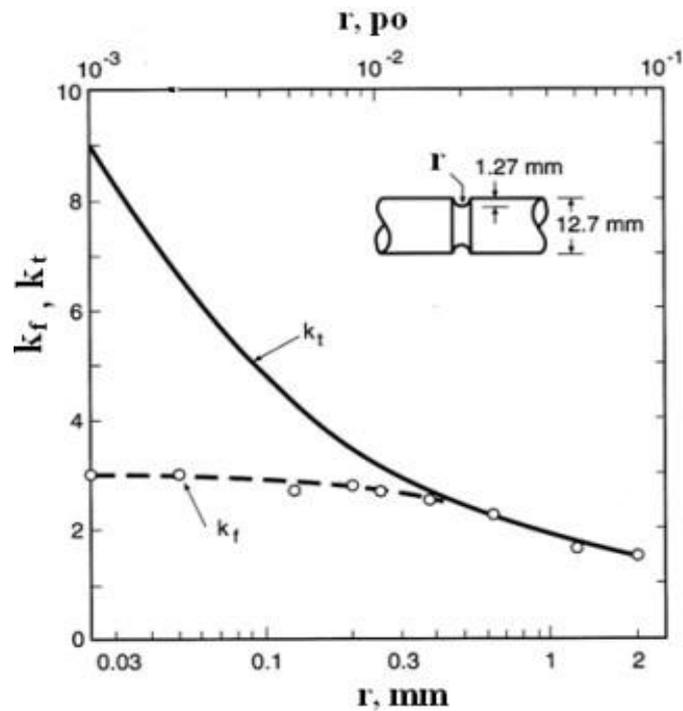


Fig. II.5 : Coefficient effectif de concentration de contraintes K_f en fonction du rayon en fond de l'entaille (Dowling 2007)

Il est observé que pour des entailles moins sévères avec un rayon au fond de l'entaille de 0,3 mm et plus, le facteur K_f se rapproche du facteur K_t , tandis que pour des entailles sévères, la différence entre K_t et K_f est plus élevée pour une profondeur d'entaille donnée.

Mais avec des rayons de courbure décroissants, le volume de matériel nécessaire diminue, et donc la probabilité d'avoir un site d'amorçage favorable diminue. Cela explique l'augmentation de l'écart entre K_f et K_t avec une augmentation de la sévérité de l'entaille.

On utilise aussi le rapport l'influence de la sévérité d'entaille K_f/K_t (nommé coefficient d'adaptation).

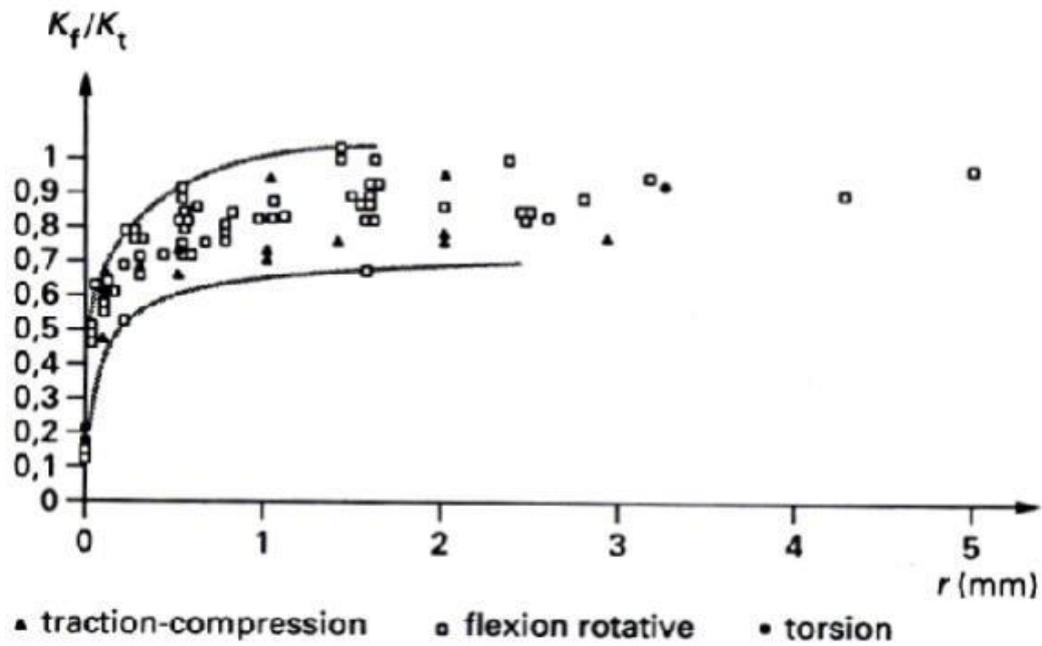


Fig. II.6 : Variation du rapport K_f/K_t en fonction du rayon r en fond d'entaille (Lieurade & Lu)

La (fig. II.6) présente l'évolution du coefficient d'adaptation en fonction du rayon en fond d'entaille, pour des aciers ayant une résistance à la traction comprise entre 400 et 700 MPa (Lieurade & Lu). On remarque également une dispersion des résultats pour des valeurs comprises entre 0,6 et 1. Pour un rayon de 2 mm en fond d'entaille, le coefficient d'adaptation peut varier entre 0,7 et 1.

II.7. Conclusion :

Le problème de la fatigue est complexe et a fait l'objet de nombreuses recherches et publications. Dans ce chapitre, nous avons abordé quelques généralités sur l'effet d'entaille. Les fissures ont été considérées comme l'unité d'étude en fatigue.

Chapitre III

Paramètres influençant sur les joints soudés

III.1. Introduction :

Les joints soudés dans les pipelines sont soumis à des contraintes élevées en raison des pressions et des températures extrêmes auxquelles ils sont exposés. Par conséquent, la qualité de la soudure et la résistance de la jointure sont des facteurs critiques pour la sécurité et la durabilité des pipelines. Les paramètres géométriques du joint, tels que l'ouverture de joint, l'angle de biseautage et la forme du joint, ainsi que l'épaisseur de la paroi du pipeline, sont des facteurs clés qui peuvent influencer la qualité et la résistance de la soudure. Dans ce contexte, il est important de comprendre l'effet de ces paramètres sur la qualité des joints soudés de pipeline afin de garantir leur fiabilité et leur longévité. Dans cette introduction, Nous allons explorer et examinerons les différents paramètres qui peuvent influencer les joints soudés de pipeline, en se concentrant sur les paramètres géométriques, l'épaisseur du matériau et l'influence de la forme et de la géométrie du joint soudé.

III.2. Paramètres géométriques d'un joint soudé :

III.2.1. Définition du soudage [15] :

Le soudage est un procédé d'assemblage qui permet de fusionner les bords des pièces à souder pour assurer leur continuité métallique. Après solidification, on obtient un joint homogène ayant les mêmes caractéristiques que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

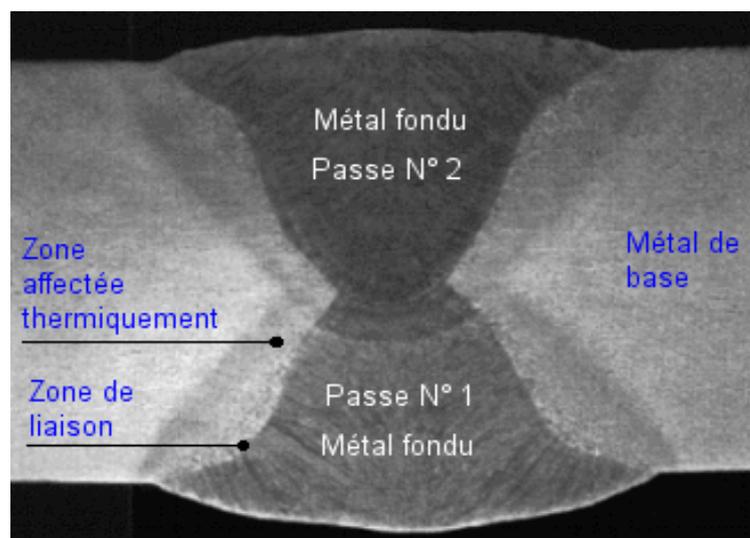


Fig. III.1 : Cordon de la soudure

Avec :

- ZF : La zone fondue (Métal fondu)
- ZAT : La zone affectée thermiquement
- MB : Le métal de base
- ZL : La zone de liaison

III.2.2. Préparation de joint :

La préparation des bords est une étape importante dans le processus de soudage, car elle permet de garantir la qualité de la soudure en permettant une fusion complète entre les deux pièces à souder. Les bords doivent être préparés de manière à ce qu'ils soient propres, lisses et exempts de toute trace de rouille, de peinture ou de contaminants. Les principales méthodes de préparation des bords sont les suivantes :

- **Chanfreinage** : Chanfreinage en X est la méthode de préparation des bords la plus courante pour les soudures bout à bout, consiste à biseauter les bords de la pièce à souder pour faciliter la fusion et la pénétration de la soudure. Le chanfrein peut être en V, en U, en fonction des exigences de la soudure.

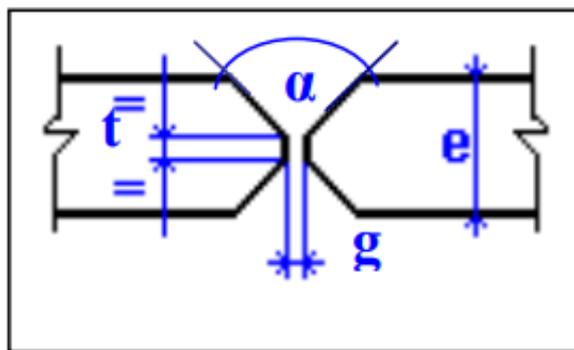


Fig. III.2 : Préparations bout à bout en X [16]

Avec :

- α : Angle d'ouverture du chanfrein
- g : Ecartement ou jeu
- t : Talon ou hauteur du méplat
- e : épaisseur de l'échantillon

- **Ebavurage** : consiste à éliminer les bavures et les aspérités sur les bords des pièces à souder pour obtenir une surface lisse et régulière.
- **Mise à niveau** : consiste à aligner les bords des pièces à souder pour assurer un ajustement parfait et une fusion complète.
- **Nettoyage** : consiste à nettoyer les bords des pièces à souder pour éliminer toute trace de contamination ou de rouille.

Le choix de la méthode de préparation des bords dépend du type de matériau à souder, de l'épaisseur des pièces, du procédé de soudage utilisé et des exigences de la soudure. Il est important de sélectionner la méthode appropriée pour assurer une soudure de haute qualité et éviter les défauts de soudure.

III.2.3. L'ouverture de joint :

(Généralement Angle d'ouverture totale : 70°) est également importante car elle peut affecter la qualité de la soudure. L'ouverture de joint doit être suffisante pour permettre une pénétration adéquate du métal de remplissage. Si l'ouverture de joint est trop étroite, cela peut entraîner une pénétration insuffisante et une faible résistance de la soudure.

III.2.4. L'angle de biseautage :

(L'angle utilisé est compris entre 30° et 60°) Est également important car il peut affecter la qualité de la soudure et la quantité de métal de remplissage nécessaire. L'angle de biseautage doit être choisi en fonction de l'épaisseur du matériau et de l'orientation de la soudure.

En conclusion, tous ces paramètres géométriques sont interconnectés et doivent être soigneusement planifiés et exécutés pour garantir une soudure de haute qualité dans l'application de fabrication de pipelines par ALFAPIPE A GHARDAÏA.

III.3. L'effet de l'épaisseur sur la ténacité :

III.3.1. Concept :

Augmenter l'épaisseur de la soudure augmente la taille de la soudure et donc la dureté. Cependant, si le processus de soudage n'est pas approprié, cela peut entraîner des défauts tels que des fissures qui peuvent affecter la dureté. Une analyse des facteurs liés au procédé

de soudage et à ses conditions est nécessaire pour déterminer l'effet de l'épaisseur de la soudure sur la dureté du métal soudé. Des normes de conception et de soudage appropriées et des méthodes de contrôle de qualité et d'inspection doivent être utilisées pour améliorer la rigidité et la ténacité.

L'effet de l'épaisseur de la soudure sur la dureté du métal soudé dépend de nombreux facteurs, tels que la **qualité du métal soudé**, le **procédé de soudage utilisé**, les **conditions du procédé** et le **contrôle de la température**, que nous mentionnerons dans ce qui suit :

III.3.2. La qualité du métal soudé :

L'acier est un alliage métallique principalement composé de fer et de carbone, avec une teneur en carbone comprise entre 0,02 % et 2 % en masse. C'est la teneur en carbone qui donne à l'alliage ses propriétés métalliques, communément appelées « acier ». L'acier API5L X70 est généralement utilisé

Avec :

API 5L : American Petroleum Institute, Spécifications pour API 5L adhérent à l'Organisation Internationale de normalisation.

X70 : grade de l'acier au carbone manganèse utilisé pour le transport des hydrocarbures sous une pression de service de 70 bars.

Les industries métallurgiques et sidérurgiques ont connu un développement important ces dernières années. Pour réduire le coût de fabrication des pipelines, de nouveaux types d'aciers ont été développés, appelés aciers à haute élasticité (HLE Steels), qui ont de bonnes propriétés mécaniques et permettent de réduire l'épaisseur des canalisations. En utilisant ces aciers, la quantité de matériaux nécessaires à la fabrication est réduite, ce qui permet de réaliser des économies importantes

III.3.3. Procédé de soudage utilisé :

Le procédé de soudage utilisé par ALFAPIPE GHARDAÏA pour fabriquer les tubes dépend du type de matériau utilisé, de l'épaisseur de paroi du tube et des exigences de qualité technique est utilisé :

- **S.A.W** (Submerged Arc Welding) : est un procédé de soudage automatique utilisant un arc électrique sous un flux de poudre. L'arc est créé entre un fil-électrode et la pièce à souder, tandis que le flux de poudre couvre la zone de soudage pour la protéger de l'air ambiant. Ce procédé est principalement utilisé pour souder des pièces en acier de grande épaisseur, car il permet de réaliser des soudures de grande qualité et de grande profondeur.

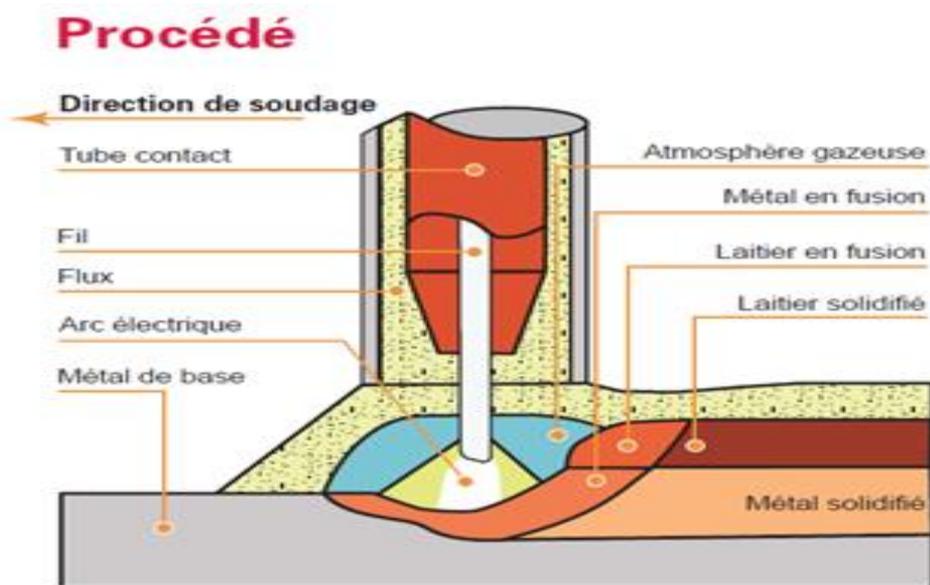


Fig. III.3 : Schéma de la technique de soudage [17]

Il y a Certaines des technologies les plus importantes utilisées sont le soudage TIG (gaz inerte au tungstène), le soudage MIG (Métal Inert Gas) -MAG (Métal Active Gas)... etc.

III.3.4. Contrôle de la température [18] :

La nuance API 5L X70 a une résistance mécanique de 570 MPa et une résistance à l'élasticité de 485 MPa.

Le préchauffage requis varie selon la qualité des pipelines en acier. La tendance à la fissuration augmente avec la résistance mécanique, l'épaisseur et la teneur en carbone, ainsi qu'en cas de températures ambiantes basses.

Les exigences de préchauffage spécifiques doivent être déterminées pour chaque situation.

La température entre les passes de soudage ne doit pas être inférieure à la température de préchauffage et ne doit pas dépasser 250°C.

Voici un figure pour sélectionner la température de préchauffage selon le carbone équivalent et l'épaisseur soudée :

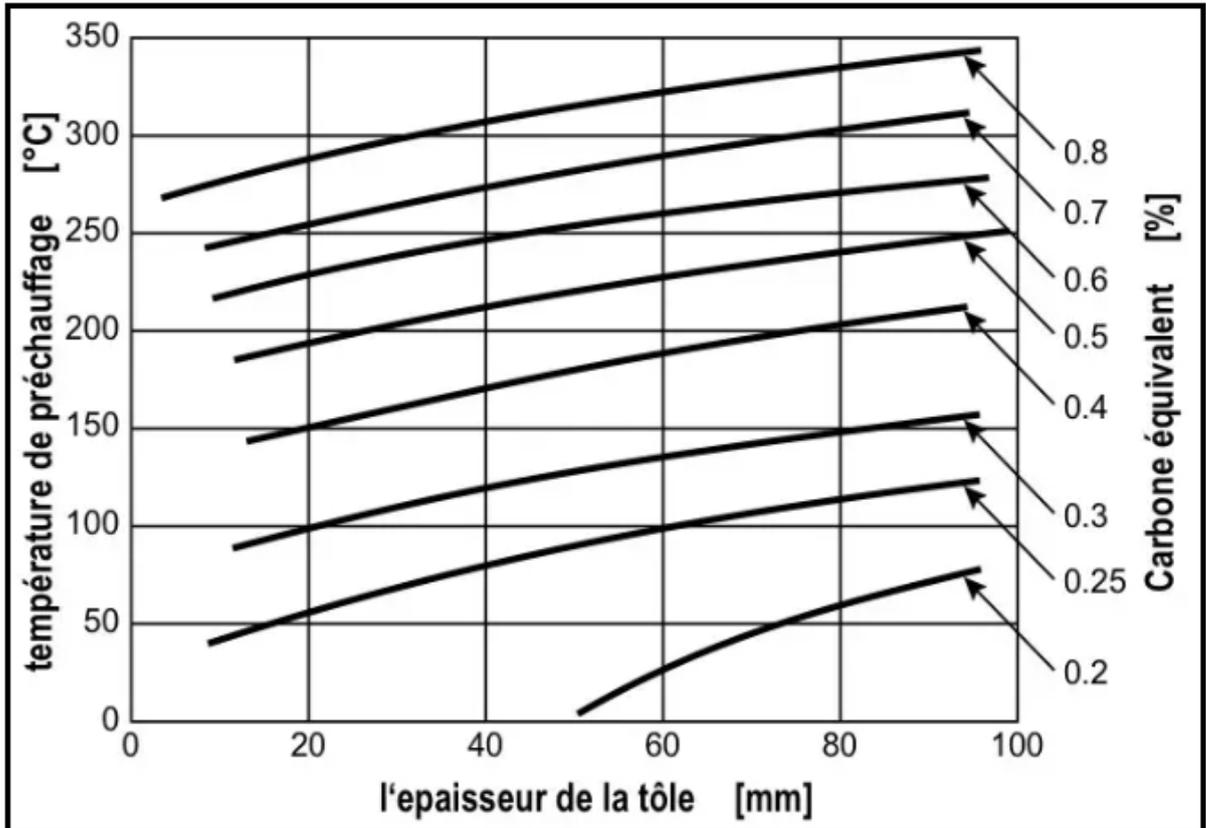


Fig. III.4 : Température de préchauffage selon le carbone équivalent et l'épaisseur soudée

III.4. Influence de la forme et de la géométrie du joint soudé :

III.4.1. Concept :

L'influence de la forme et de la géométrie du joint soudé est un concept important en soudage, Et donc La forme et la géométrie du joint soudé peuvent affecter la qualité de la soudure, la résistance de la soudure et la capacité de la structure soudée à résister aux charges. Les paramètres tels que l'angle de joint, la profondeur de pénétration et la largeur de la soudure sont importants à considérer lors de la conception et de la préparation du joint. Des méthodes telles que l'utilisation de chanfreins, la préparation de bords droits et la préparation des surfaces de soudure peuvent être utilisées pour optimiser la forme et la géométrie du joint soudé.

III.4.2. Chanfreinage :

Le fait de ne pas effectuer un bon chanfreinage du métal de base avant le soudage peut entraîner des défauts dans la soudure, tels que des gaz piégés, des effondrements, des fissures et des fissures, ce qui affecte négativement la qualité, la résistance et la durabilité du joint soudé. Un bon chanfrein en métal de base améliore la qualité du joint soudé et pour obtenir une meilleure adhérence entre les deux bords soudés, en plus réduit la possibilité de défauts dans la soudure.

III.4.3. Ebavurage :

L'ébavurage, qui consiste à enlever les bavures et les excès de matière autour de la zone de soudure, peut avoir un impact significatif sur la qualité et la résistance de la jointure soudée. En effet, les bavures peuvent créer des zones de concentration de contraintes qui peuvent conduire à des fissures et à une réduction de la résistance à la fatigue. De plus, les excès de matière peuvent empêcher la pénétration complète du métal fondu dans la zone de soudure, créant ainsi des vides ou des porosités qui peuvent également réduire la résistance de la jointure soudée. En éliminant les bavures et les excès de matière, on peut Améliorer l'aspect visuel de l'articulation et la qualité de la jointure soudée et augmenter sa résistance.

III.4.4. Mise à niveau :

La mise à niveau une étape importante dans la préparation d'un joint soudé de pipeline, Il peut assurer une meilleure pénétration de la soudure et une meilleure adhérence entre les pièces. En outre côté, une mise à niveau appropriée peut également contribuer à améliorer la résistance et la durabilité de la soudure. Il est important de s'assurer que la mise à niveau est effectuée avec précision pour éviter toute contrainte excessive sur la soudure, ce qui pourrait entraîner des défaillances prématurées de la structure.

III.4.5. Nettoyage :

Le nettoyage est essentiel dans la préparation de la zone de soudure car il permet d'éliminer les contaminants tels que la graisse, l'huile, la rouille et les résidus de peinture qui peuvent causer des défauts de soudure. Un nettoyage adéquat peut également améliorer la qualité de la pénétration de la soudure et réduire les risques de fissuration. De plus, un

nettoyage approprié peut également avoir un impact sur la résistance et la durabilité de la structure soudée, car les contaminants peuvent causer une corrosion prématurée. Ainsi, pour assurer une qualité de soudure optimale, il est nécessaire de bien nettoyer les surfaces à souder des contaminants et de créer une surface propre et homogène.

III.4.6. L'ouverture de joint :

L'ouverture de joint est un facteur nécessaire à considérer lors de la soudure, car elle peut influencer la qualité de la soudure. Une ouverture de joint incorrecte peut entraîner des défauts de soudure tels que des manques de fusion, des porosités ou des fissures. Si l'ouverture est trop grande, cela peut causer une perte de matière qui peut affecter la résistance de la soudure. D'un autre côté, si l'ouverture est trop petite, cela peut entraîner une pénétration insuffisante de la soudure, ce qui peut également réduire la résistance de la soudure. Il est donc important de déterminer l'ouverture de joint appropriée en fonction des matériaux à souder et des exigences de la soudure.

III.4.7. L'angle de biseautage :

L'angle de biseautage est un facteur nécessaire pour la qualité de la jointure soudée. Un angle plus grand permet une meilleure adhérence et une plus grande profondeur de pénétration, mais augmente les coûts et la quantité de métal utilisé. D'un autre côté, un angle de biseautage plus petit peut réduire le coût de production et la quantité de métal de soudure nécessaire, mais peut affecter la qualité de la soudure en réduisant la profondeur de pénétration et l'adhérence. Le choix de l'angle dépend des matériaux, de l'épaisseur des pièces, de la méthode de soudage et de la qualité souhaitée pour éviter les défauts

III.4.8. Exemples de Défaut :

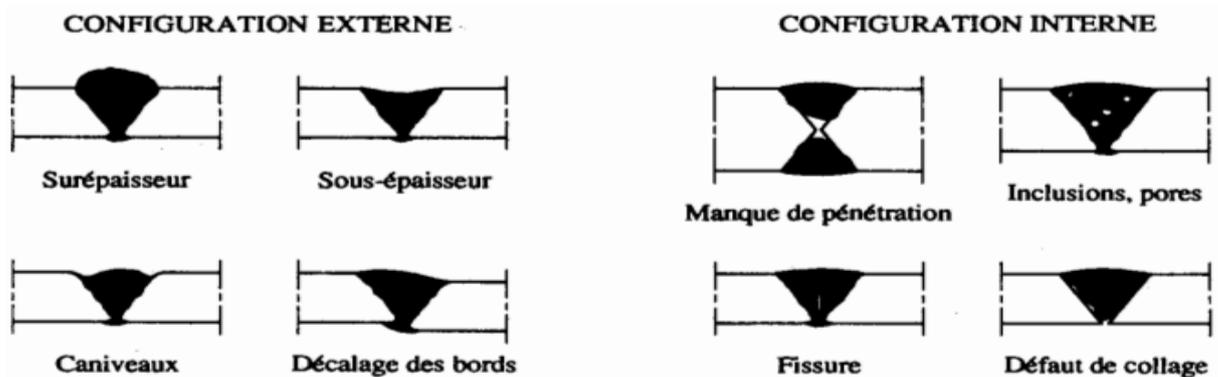


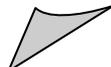
Fig. III.5 : Anomalies de souduras [19]

III.5. Conclusion :

En conclusion, les paramètres géométriques, l'épaisseur des pièces et la forme et géométrie du joint sont des éléments clés qui affectent la qualité des joints soudés. Il est important de comprendre comment ces paramètres peuvent affecter le processus de soudage et la résistance des joints soudés. Le choix de ces paramètres doit être effectué en fonction de la nature des matériaux à souder, de la méthode de soudage utilisée et de la qualité de la soudure souhaitée. Une mauvaise sélection de ces paramètres peut conduire à des défauts de soudure tels que des porosités, des manques de fusion, fissures ou une faible résistance mécanique. Par conséquent, il est important de bien maîtriser ces paramètres pour obtenir des joints soudés de qualité et assurer la sécurité et la fiabilité des structures soumises à des contraintes mécaniques importantes.

Chapitre IV

Etude expérimentale



IV.1. Introduction :

Les essais destructifs réalisés sur un anneau de tube sont des essais mécaniques essentiels pour évaluer les propriétés et la résistance du matériau utilisé dans la fabrication des tubes. Ces essais visent à simuler les conditions réelles auxquelles les tubes seront soumis et à déterminer leur comportement face à différentes charges et contraintes. C'est le test le plus basique (analyse chimique, dureté, résilience, traction, pliage). Son laboratoire d'essais mécaniques dispose d'équipements fiables étalonnés périodiquement.

Les clients de l'entreprise ALFAPIPE comptent sur le suivi de ces tests en raison de leur grande importance.

IV.2. Etudes des matériaux :

L'acier API 5L X70 est un type d'acier à haute résistance largement utilisé dans l'industrie des pipelines. Il fait référence à la norme API 5L, qui spécifie les exigences pour le pipeline en acier utilisés dans le transport de gaz, de pétrole et d'autres fluides. Le "X70" fait référence à la résistance minimale à la traction de l'acier, qui est d'environ (480 MPa).

L'acier API 5L X70 est caractérisé par sa résistance élevée, sa ténacité et sa bonne résistance à la corrosion. Il est conçu pour résister aux contraintes et aux conditions de service sévères auxquelles les pipelines peuvent être soumis. Cela en fait un choix populaire pour les pipelines terrestres et sous-marins dans l'industrie pétrolière et gazière.

En termes d'applications, l'acier API 5L X70 est couramment utilisé dans la construction de pipelines pour le transport de pétrole, de gaz naturel et d'autres fluides à haute pression. Il est également utilisé dans d'autres domaines de l'industrie, tels que la construction navale, la fabrication d'équipements lourds et les structures offshore





Fig. IV.1 : Domaines d'utilisation des aciers API 5L X70 [20] [21]

- **Analyse chimique [22] :**

Nous avons effectué une analyse chimique à l'aide d'un spectromètre à émission optique de marque « SPECTROMAXx / LASMx » disposé au niveau de l'entreprise ALFAPIPE GHARDAIA, dans le but de confirmer la composition chimique des bobines (métal de base).



Fig. IV.2 : SPECTROMAXx à émission optique utilisé pour l'analyse chimique

- **Propriétés mécaniques :**

API 5L	Epaisseur (mm)	Re (MPa)	Rm	A (%)	Re/Rm
X70	7-25	485-635	570-760	≥ 18	0.90

Tableau IV.1. Caractéristiques mécaniques de l’X70 selon l’API5L

Avec :

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

IV.2.1. Essais statique :

IV.2.1.1. Essais de Créer l’entaille (traction) :

L’entaille est réalisée d’une manière approuvée en utilisant des techniques appropriées telles que la découpe, le fraisage ou l’usinage.

L’objectif de la création d’une entaille est d’évaluer la résistance à la joint de soudure et la ténacité du matériau en présence de cette discontinuité.

- **L’entaille transversale :**

Dans L’entaille transversale, la fente ou l’entaillage est positionné à travers l’axe principal de l’Échantillon. L’entaillage transversal crée une zone de concentration de contraintes perpendiculaire à l’axe principal

- **L’entaille longitudinale :**

Dans L’entaille longitudinale la fente ou l’entaillage est réalisé parallèlement à l’axe principal de l’Échantillon. Cela signifie que l’entaillage est aligné dans la même direction que la force appliquée lors de l’essai de traction. L’objectif de l’entaillage longitudinal est de créer une zone de concentration de contraintes le long de l’axe principal

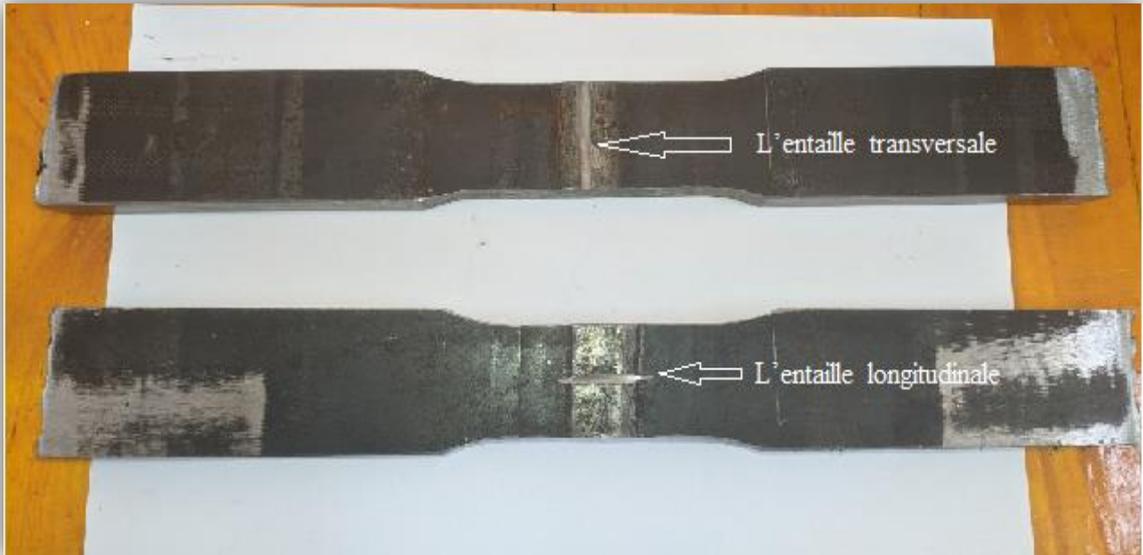


Fig. IV.3 : L'entaille transversale et longitudinale

IV.2.1.2. Essai de traction pour deux échantillons d'épaisseurs différentes :

L'essai de traction sur deux échantillons d'épaisseurs différentes est une procédure standard dans laquelle une force de traction est appliquée à deux échantillons de différentes épaisseurs pour mesurer leur réponse mécanique. L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité des matériaux à résister à la traction et de déterminer leurs propriétés mécaniques fondamentales pour chaque échantillon.

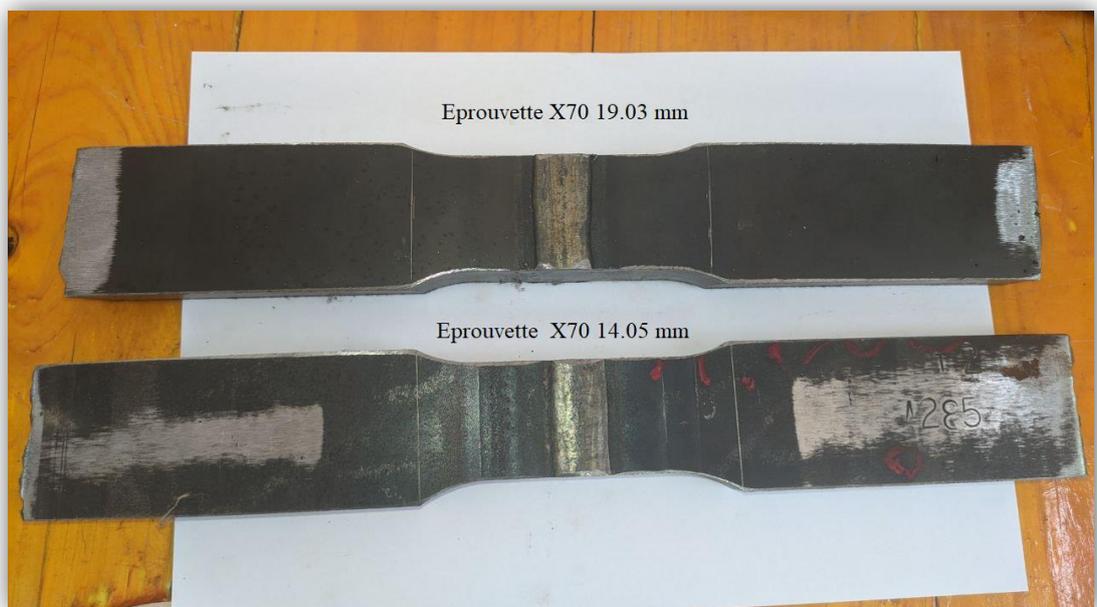


Fig. IV.4 : Les deux échantillons d'épaisseurs différentes

IV.2.2. Essais métallurgiques :

IV.2.2.1. Essais de dureté [23] :

IV.2.2.1.1. Généralités :

La dureté d'un matériau mesure sa résistance à la pénétration par un corps plus dur. Les essais de dureté sont généralement utilisés pour caractériser les matériaux métalliques en raison de leur rapidité. Ils permettent d'évaluer les propriétés mécaniques statistiques telles que la résistance et la rigidité sans avoir à effectuer des essais de traction longs et coûteux. Ils sont donc utiles pour le contrôle qualité des matériaux.

Il existe un grand nombre de tests possibles, surtout Brinell, Rockwell, Vickers, très important .

Les valeurs obtenues sont des valeurs comparatives.

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

Dans l'entreprise ALFAPIPE utiliser l'essai dureté Vickers

IV.2.2.1.2. Essais Vickers :

L'essai de dureté Vickers consiste à appliquer une charge F pendant 15 secondes à l'aide d'un pénétrateur en forme de pyramide à base carrée avec un angle de 136°, généralement en diamant. Après avoir retiré la charge, on mesure la diagonale d de l'empreinte laissée par le pénétrateur. La dureté Vickers est calculée en utilisant le rapport F/S (sans unité), où F est la charge appliquée et S est la surface de l'empreinte. HV, suivi de la valeur de la charge, par exemple : 255 HV 30.

$$HV = \frac{2F(\sin 136^\circ / 2)}{g \cdot d^2} = \frac{0.189F}{d^2}$$

Avec :

- F : force appliquée (N)
- d : valeur moyenne des diagonales de l'empreinte (mm)
- g : accélération terrestre ($9,80665 \text{ m. s}^{-1}$)

L'utilisation d'une pyramide à base carrée comme pénétrateur dans l'essai de dureté Vickers présente l'avantage d'obtenir des mesures pratiquement indépendantes de la charge appliquée, contrairement aux essais Brinell ou Rockwell

Cela permet d'obtenir une large gamme de valeurs de dureté, couvrant aussi bien les plastiques que les aciers cémentés. Cependant, la mesure de la diagonale d dans cet essai nécessite l'utilisation d'un système optique, ce qui rend la manipulation relativement longue.

L'essai de dureté Vickers est adapté aux matériaux homogènes de toutes les duretés, mais il est particulièrement utilisé pour les matériaux extrêmement durs en couche très mince, tels que les aciers cémentés et les aciers nitrurés. L'empreinte laissée par l'essai Vickers est encore plus petite que celle de l'essai Rockwell.

Il est donc important d'obtenir, lors de l'essai, d_1 , et d_2 de même ordre de grandeur.

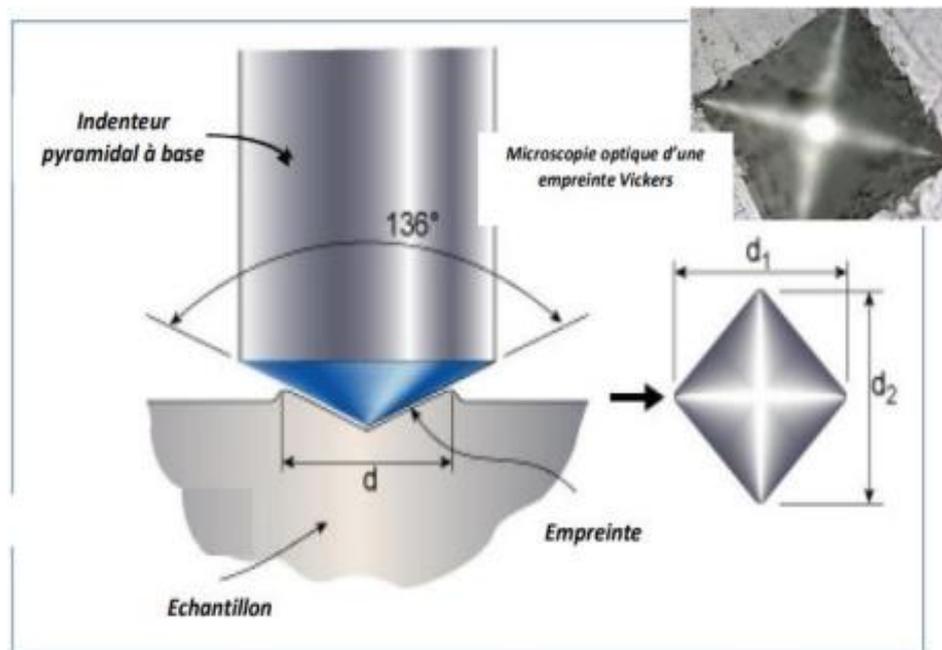


Fig. IV.5 : Principe de l'essai Vickers [24].

L'essai de dureté a été effectué sur l'échantillon, sur une machine nommée Duromètre (Zwick Roell ZHV 10) (Fig. IV.8)

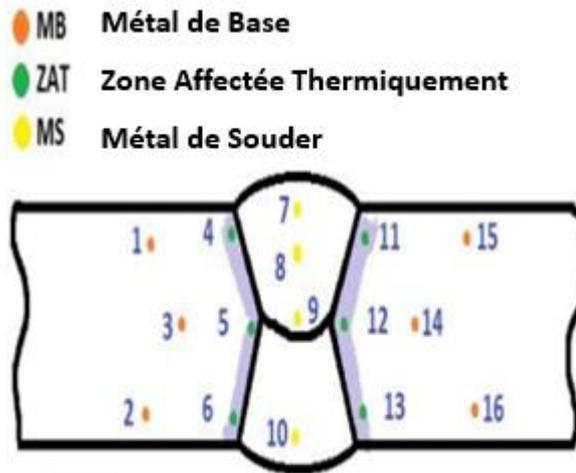


Fig. IV.6 : Variation de dureté Vickers dans les trois zones.

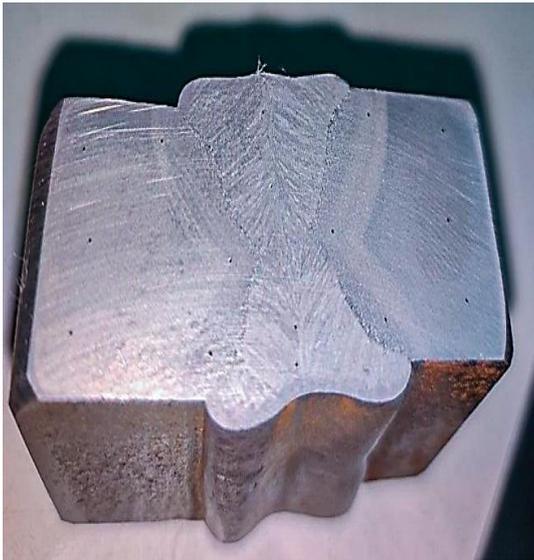


Fig. IV.7 : L'essai de dureté a été effectué sur l'échantillon



Fig. IV.8 : Appareil de micro dureté

IV.3. Essai de traction :

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le

module de d'élasticité, le coefficient de poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

L'essai de traction permet en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique [25].

Lors d'un essai de traction, un échantillon de matériau est soumis à une force de traction uni axiale qui est appliquée de manière progressive. Cette éprouvette a une section transversale rectangulaire avec des extrémités élargies pour faciliter la fixation dans la machine de traction. Les dimensions de l'éprouvette, telles que la largeur et l'épaisseur, sont généralement spécifiées dans les normes de test correspondantes.

L'essai de traction mesure la réponse du matériau à la force de traction appliquée en enregistrant la relation entre la force appliquée et la déformation résultante. Ces données permettent de tracer une courbe de traction, également appelée courbe contrainte-déformation, qui montre comment le matériau réagit à la charge.



Fig. IV.9 : échantillon après traction



Ancienne machine de traction



Nouvelle machine de traction

Fig. IV.10 : machine de traction

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction présenté dans La (fig. IV.11)

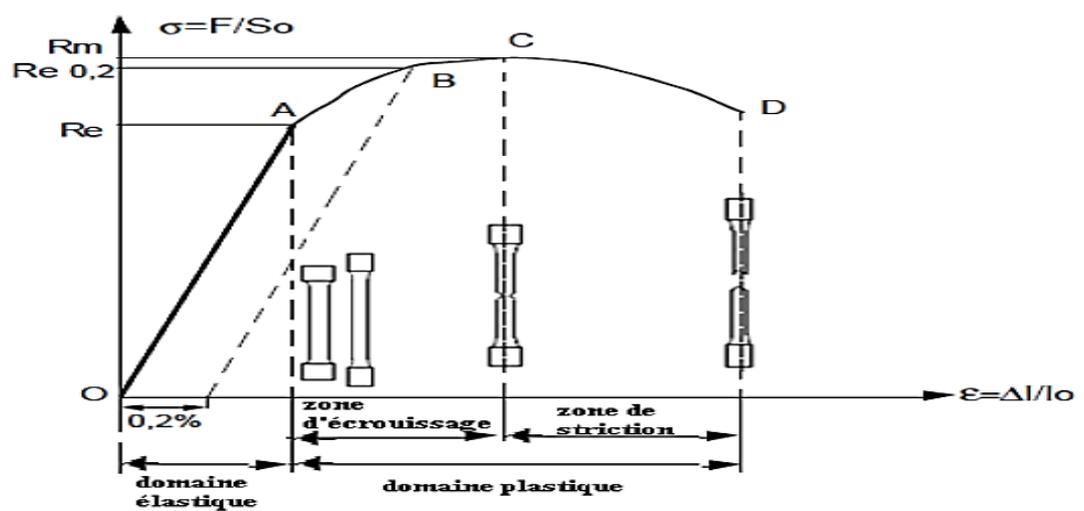


Fig. IV.11 : Diagramme de traction

On peut dire que ce graphe se divise en 3 domaines :

- OA : domaine élastique à déformation réversible, le point A marque la limite du domaine élastique
- AC : domaine de déformation permanent homogène ou de déformation plastique répartie, le point C se situe à charge maximale et au début de la striction
- CD : domaine de striction ou de déformation plastique localisé, D point de rupture de l'éprouvette

IV.4. Essai de pliage :

L'essai de pliage sur l'acier API 5L X70 est une méthode utilisée pour évaluer la résistance à la fatigue de ce matériau spécifique lorsqu'il est soumis à des charges de flexion.

Au cours de l'essai, l'échantillon est soumis à des cycles de flexion répétés avec une amplitude de charge spécifiée. Les cycles de flexion sont appliqués jusqu'à ce que l'échantillon atteigne un certain nombre prédéfini de cycles ou jusqu'à ce qu'il se rompe. La contrainte et le nombre de cycles sont enregistrés pendant l'essai pour établir une courbe de durée de vie en fatigue.

Le prélèvement des éprouvettes est le plus souvent effectué dans le sens travers (perpendiculairement à la soudure) pour tester l'aptitude au pliage endroit ou envers du joint soudé

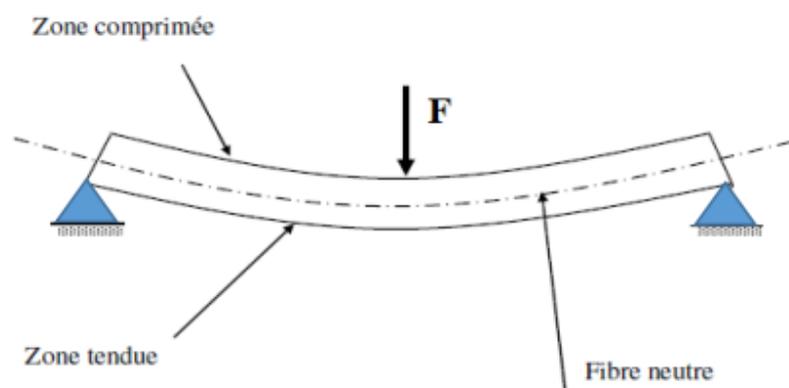


Fig. IV.12 : Modélisation d'un essai de flexion trois points [1].



Ancienne machine de pliage



Nouvelle machine de pliage

Fig. IV.13 : machine de pliage



Fig. IV.14 : Essai de pliage

IV.5. Résultat et Discussions :

IV.5.1. Analyse chimique :

On a réalisé une analyse chimique sur le métal de base, afin de déterminer sa composition.

Un échantillon du métal de base de dimension 45X30 cm, est mis sur le SPECTROMAXx

Les résultats obtenus par cette machine du laboratoire de l'entreprise ALFAPIPE

GHARDAIA sont classé dans le tableau suivant

Désignation	Maximum sur produit
Carbone (C)	0.063
Silicium (SI)	0.217
Manganèse (Mn)	1.607
Phosphore (p)	0.0087
Soufre (s)	0.0024
Azote (N)	0.0027
Vanadium (v)	0.0064
Niobium (Nb)	0.0519
Titane (Ti)	0.0095
Cuivre (Cu)	0.011
Nickel (Ni)	0.139
Chrome (Cr)	0.184
Bore (B)	0.0003
Calcium (Ca)	0.002
Molybdène (Mo)	0.096
Tin (Sn)	0.003

Tableau IV.2. Résultats de l'analyse chimique

D'après le (Tableau IV.2), nous constatons que l'acier API 5L X70 a une faible teneur en carbone. La faible teneur en carbone est nécessaire pour améliorer la soudabilité et la résilience de l'acier.

Désignation	Maximum sur produit
Carbone (C)	0.120
Silicium (SI)	0.450
Manganèse (Mn)	1.700
Phosphore (p)	0.025
Soufre (s)	0.015
Azote (N)	0.012
Vanadium (v)	0.10
Niobium (Nb)	0.06
Titane (Ti)	0.060
Cuivre (Cu)	0.250
Nickel (Ni)	0.30
Chrome (Cr)	0.30
Bore (B)	0.0005
Calcium (Ca)	0.006
Molybdène (Mo)	0.10
Tin (Sn)	0.010

Tableau IV.3. Composition chimique X70 la norme API 5 L

D'après les tableaux ci-dessous, nous avons constaté que les valeurs de la composition chimique trouvée n'ont pas dépassé la norme API 5L.



Fig. IV.15 : L'échantillon après le test d'analyse chimique

IV.5.2. Essais statique :

IV.5.2.1. Essais de Créer l'entaille transversale et longitudinale (traction) :

L'essai de traction consiste à soumettre deux éprouvettes à une force de traction jusqu'à leur rupture, dans le but de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.

Avec a l'aide ALFAPIPE GHARDAIA Nous avons réalisées l'essai de traction sur l'échantillon. Les caractéristiques mécaniques conventionnelles sont représentées sur la figure et le tableau ci-dessous.

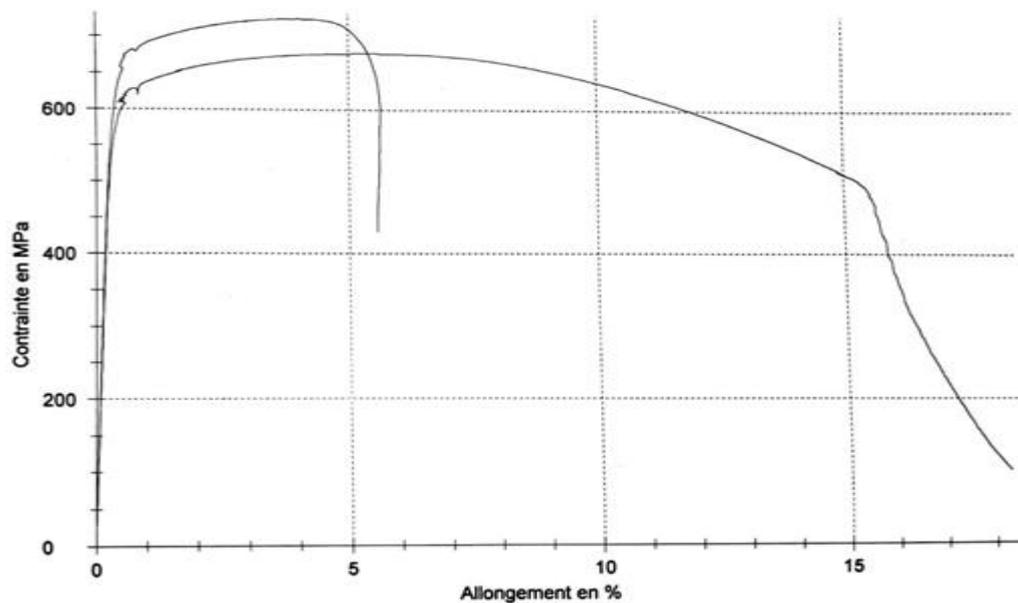


Fig. IV.16 : la courbe de traction transversale et longitudinale

Date	Eprouvette	a_0 (mm)	b_0 (mm)	S_0 (mm ²)	R_m (MPA)	$A_{50.8}$ (%)
14/05/2023	Défaut transversale	12.63	41.16	519.85	726	5.4
14/05/2023	Défaut longitudinale	12.66	40.88	517.54	678	18.2

Tableau IV.4. Résultat Essai traction (transversale et longitudinale)

Dans la première courbe qui correspondre aux un échantillon de l'entaille transversale, la résistance mécanique R_m égal 726 MPa et l'allongement pouvant se poursuivre jusqu'à 5.4%.

La deuxième courbe représente échantillon aux l'entaille longitudinale une résistance mécanique $R_m = 678 \text{ MPa}$, et un allongement pouvant continuer à 18.2 %.

En analysant les résultats, nous constatons que la courbe de l'entaille longitudinale présente un rapport d'allongement (A%) plus élevé par rapport à la courbe de l'entaille transversale, qui présente un rapport d'allongement plus faible. Cela peut être attribué à la nature de l'entaille.

Après avoir créé les deux fentes (transversale et longitudinale). L'observation faite est que la rupture ne s'est pas produite au niveau du joint soudé, et cela est attribué à la résistance supérieure du joint soudé par rapport au métal de base. Cela souligne l'importance d'un processus de soudage approprié et de haute qualité pour garantir des joints solides et fiables dans les structures et les composants.

Dans le cas d'une entaille transversale, la contrainte est concentrée au niveau de l'extrémité de l'entaille, ce qui facilite l'amorçage et la propagation de la fracture dans le matériau. En conséquence, il a une plus grande fragilité.

D'un autre côté, dans le cas d'une l'entaille longitudinale. Les contraintes sont réparties uniformément sur la longueur de l'échantillon, de sorte que la vitesse de propagation de la rupture est inférieure à celle de l'entaille transversale.

Ce qui nous mène à dire que les résultats de l'essai de traction répondent aux conditions exigé par la norme API 5L.

Nuance : X70	FABRICATION ET CONTROLE SELON LA NORME API5L		
Contrôle destructif *laboratoire mécanique*			
Essai de traction			
Éprouvette	Caractéristiques mécaniques	Valeurs La norme API 5L	
		MIN	MAX
TN traction normale	E0.5	485 MPa	635 MPa
	Rm	570 MPa	760 MPa
	E0.5/R	0.79 %	0.90 %
	A%	22%	/
TS traction sur soudure	Rm	570 MPa	760 MPa

Tableau IV.5. Les normes essai de traction API 5L X70 [26]



Fig. IV.17 : Résultats de l'essai de traction (l'entaille transversale et longitudinale)

Nous calculons le Facteur de concentration de contrainte (K_t) et Facteur d'intensité de contraintes (K_I) des deux entailles différentes transversale et longitudinale

➤ **Facteur de concentration de contrainte (K_t) :**

$$K_t = \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{nom}}$$

Avec :

K_t : Facteur de concentration de contrainte (sans unité)

σ_{loc} : Contraint locale

$$\sigma_{loc} = R_{e0.2}$$

σ_{nom} : Contrainte nominale appliquée

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{S}$$

• **l'entaille transversale \perp au cordon de la soudure :**

($b_T = 2, 3, 4, 5, 6$ mm, $a = 2$ mm)

Les résultats des facteurs de concentration de contraintes pour différent forme d'éprouvette avec entaille transversale sont donnés dans le tableau suivant :

a : Longueur de l'entaille (mm)

b_T : Largeur de l'entaille (mm)

b_T (mm)	a (mm)	b/a	$R_{e0.2} = \sigma_{loc}$ (MPa)	σ_0 (MPa)	R_m (MPa)	K_{tT}
2	2	1	948	300	965	3.16
3	2	1.5	902	300	920	3.00
4	2	2	815	300	832	2.71
5	2	2.5	720	300	739	2.40
6	2	3	660	300	678	2.20

Tableau. IV.6 : Facteurs de concentration de contraintes (K_t) de l'entaille transversale

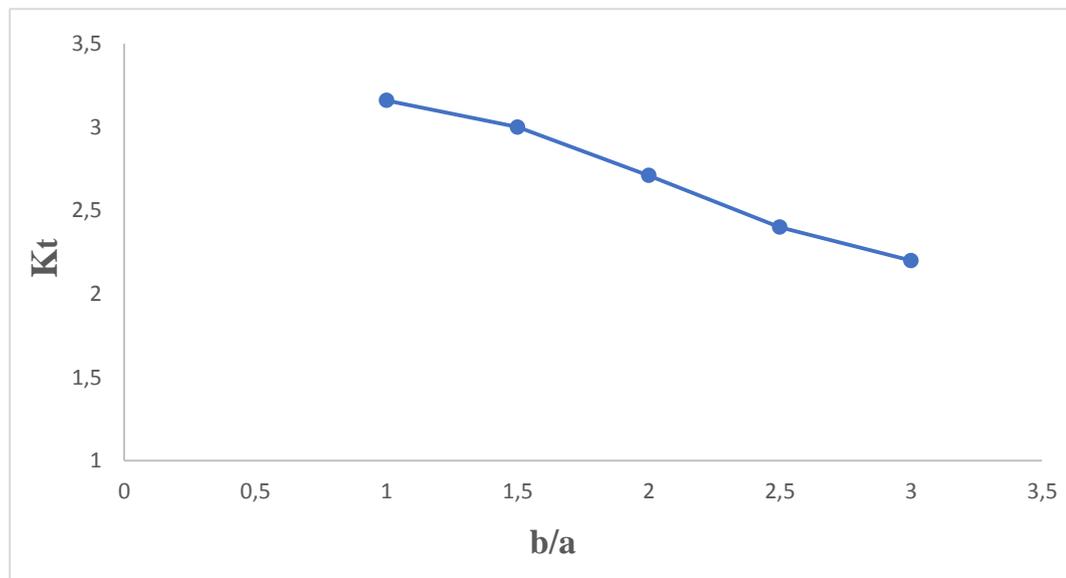


Fig. IV.18 : K_t en fonction de b/a pour l'entaille transversale

Nous concluons, plus la valeur de b/a augmenté dans une l'entaille transversale, plus le facteur de concentration de contrainte K_t diminue.

- l'entaille longitudinale // au cordon de la soudure :

($b_L = 2, 3, 4, 5, 6$ mm, $a = 2$ mm)

Les résultats des facteurs de concentration de contraintes pour différent forme d'éprouvette avec entaille longitudinale sont donnés dans le tableau suivant

b_L (mm)	a (mm)	b/a	$R_{e0.2} = \sigma_{loc}$ (MPa)	σ_0 (MPa)	R_m (MPa)	K_{tL}
2	2	1	996	300	975	3.35
3	2	1.5	942	300	960	3.15
4	2	2	875	300	891	2.91
5	2	2.5	782	300	798	2.61
6	2	3	710	300	726	2.36

Tableau. IV.7 : Facteurs de concentration de contraintes (K_t) de l'entaille longitudinale

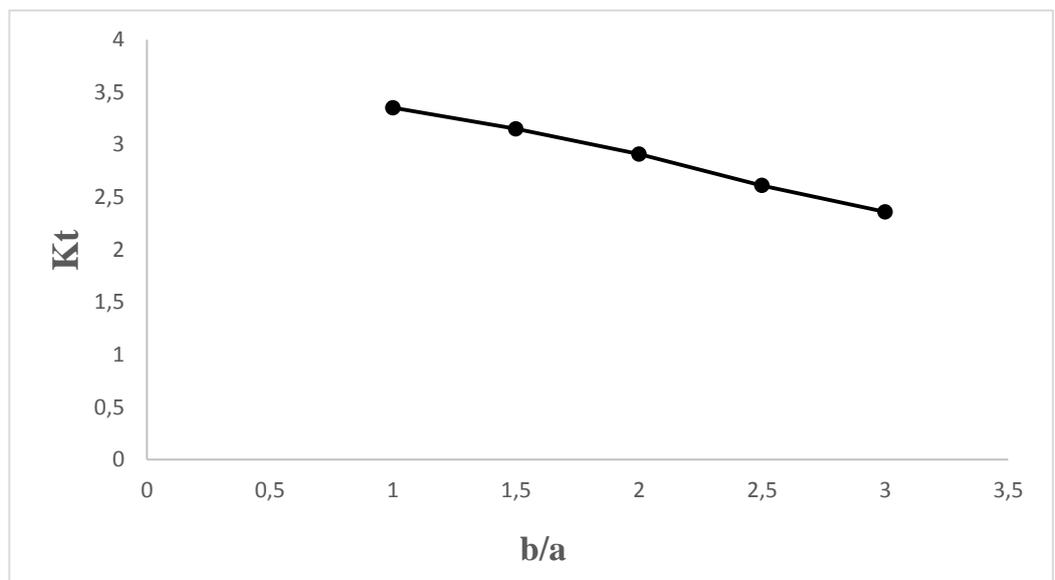


Fig. IV.19 : K_t en fonction de b/a pour l'entaille longitudinale

Nous concluons, plus la valeur de b/a augmente dans une l'entaille longitudinale, plus le facteur de concentration de contrainte K_t diminué.

La figure suivante montre la comparaison entre les facteurs de concentration de contraintes K_t des éprouvettes de différents forme d'entaille (transversale et longitudinale)

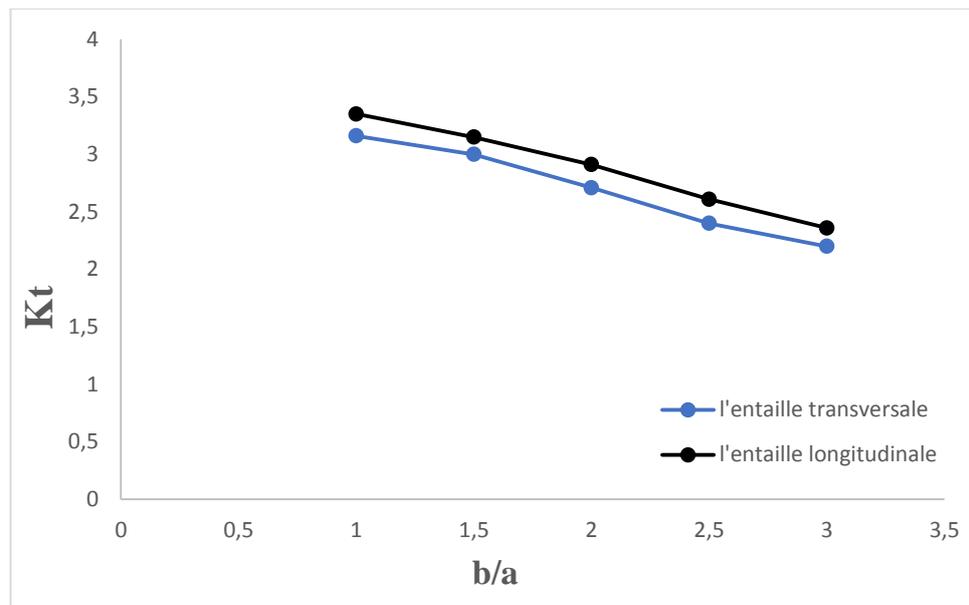


Fig. IV.20 : Comparaison entre les facteurs de concentration de contraintes K_t des éprouvettes de différents forme d'entaille (transversale et longitudinale).

➤ **Facteur d'intensité de contraintes (K_I) :**

Nous présentons dans ce qui suit la variation des facteurs d'intensité de contraintes (K_I) en fonction de la variation de la propagation de longueur de fissure pour différent forme d'éprouvette avec entaille transversale et longitudinale :

$$K_I = f(\alpha) \sigma_{0.2e} \sqrt{\pi a}$$

Où α le coefficient de géométrie caractéristique du couple « pièce – fissure ». La valeur de ce coefficient est obtenue pour la valeur de $\alpha = (a/W)$ égale ; selon la formule

$$f(\alpha) = 1,1 - 0,231 \alpha + 10,55 \alpha^2 - 21,71 \alpha^3 + 30,382 \alpha^4$$

La relation du facteur d'intensité de contrainte en tenant compte du facteur de correction (de la géométrie) $f(\alpha)$:

- **l'entaille transversale :**

Les résultats des facteurs d'intensité de contraintes (K_I) en fonction de la variation de la propagation de longueur de fissure de l'éprouvette avec entaille transversale sont donnés dans le tableau suivant :

a (mm) \ b_T (mm)	2	4	6	8	10	K_I
2	2630.7	5933.74	10978.46	17855.64	26836.54	
3	2480.5	4311.72	7738.74	12458.36	18565.12	
4	2261.6	3502.75	6188.84	9705.62	14338.24	
5	1980	3005.88	3632.58	8116.2	11934.72	
6	1831.5	2697.90	3228.96	7088.14	10235.68	

Tableau. IV.8 : Facteur d'intensité de contrainte (K_I) pour l'entaille transversale

Avec :

a : Longueur de l'entaille (mm)

b_T : Largeur de l'entaille (mm)

La variation de facteur d'intensité de contrainte (K_I) en fonction de longueur de l'entaille a (mm) pour l'entaille transversale est représentée sur la figure suivante

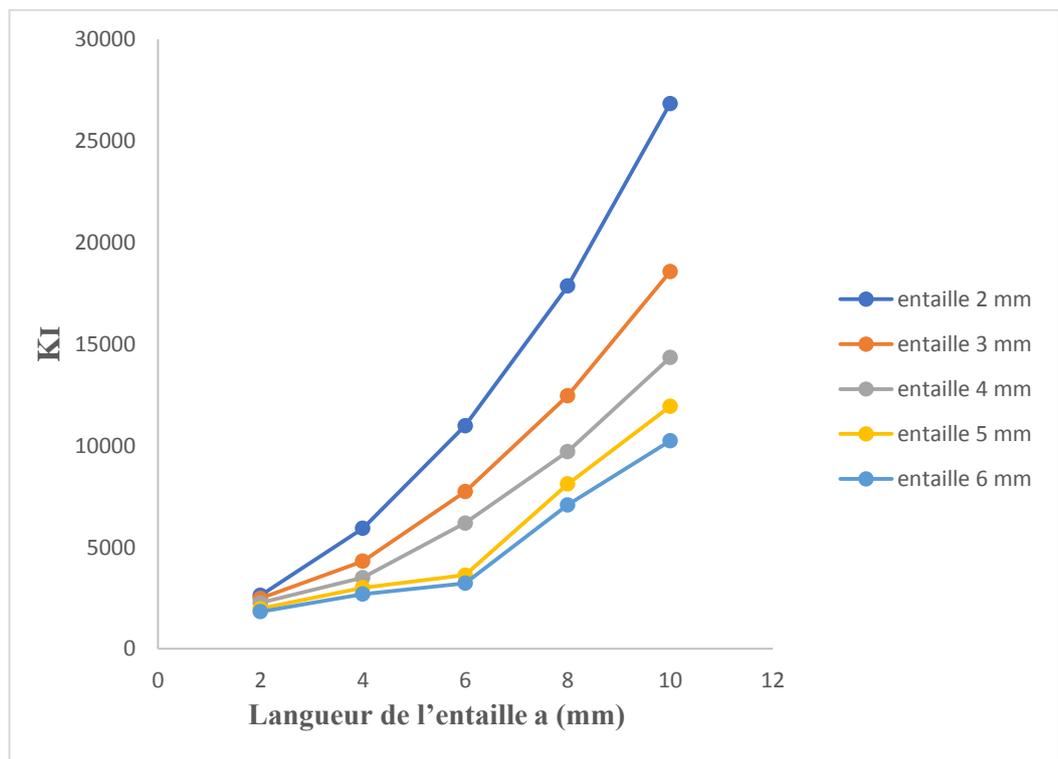


Fig. IV.21 : Variation de facteur d'intensité de contrainte (K_I) en fonction de Taille de la fissure a (mm) pour l'entaille transversale

On remarque dans l'entaille transversale que lorsque la Largeur de l'entaille (b_T) augmente, la Facteur d'intensité de contraintes (KI) diminue. En revanche, plus la longueur de l'entaille (a) est diminuée, plus la Facteur d'intensité de contraintes (KI) est diminuée .

- l'entaille longitudinale :

Les résultats des facteurs d'intensité de contraintes (KI) en fonction de la variation de la propagation de longueur de fissure de l'éprouvette avec entaille longitudinale sont donnés dans le tableau suivant :

a (mm) \ b _L (mm)	2	4	6	8	10	K_I
2	2763.9	6159.6	11301.36	18261.45	27350.4	
3	2614.05	4517.04	8072.4	12850.65	19062.4	
4	2428.12	4739.76	6457.92	10145.25	14918.4	
5	2170.05	3202.99	5489.23	8522.01	12432	
6	1970.25	2874.48	4843.44	7439.85	10774.4	

Tableau. IV.9 : Facteur d'intensité de contrainte (KI) pour l'entaille longitudinale

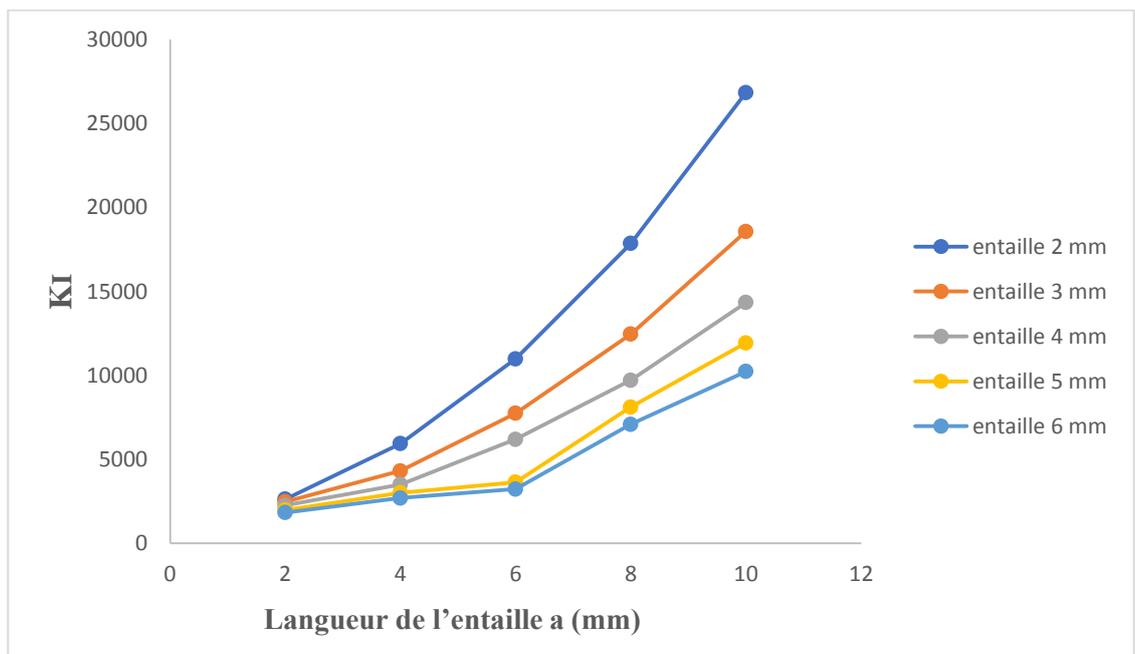


Fig. IV.22 : Variation de facteur d'intensité de contrainte (KI) en fonction de Taille de la fissure a (mm) pour l'entaille longitudinale

On remarque dans l'entaille longitudinale que lorsque la Largeur de l'entaille (b_L) diminue, la Facteur d'intensité de contraintes (KI) augmente. En revanche, plus la longueur de l'entaille (a) est élevée, plus la Facteur d'intensité de contraintes (KI) est élevé.

IV.5.2.2. Essai de traction pour deux échantillons d'épaisseurs différentes :

Après avoir soumis les deux échantillons au laboratoire de traction, nous avons observé les propriétés mécaniques indiquées sur la figure et le tableau ci-dessous

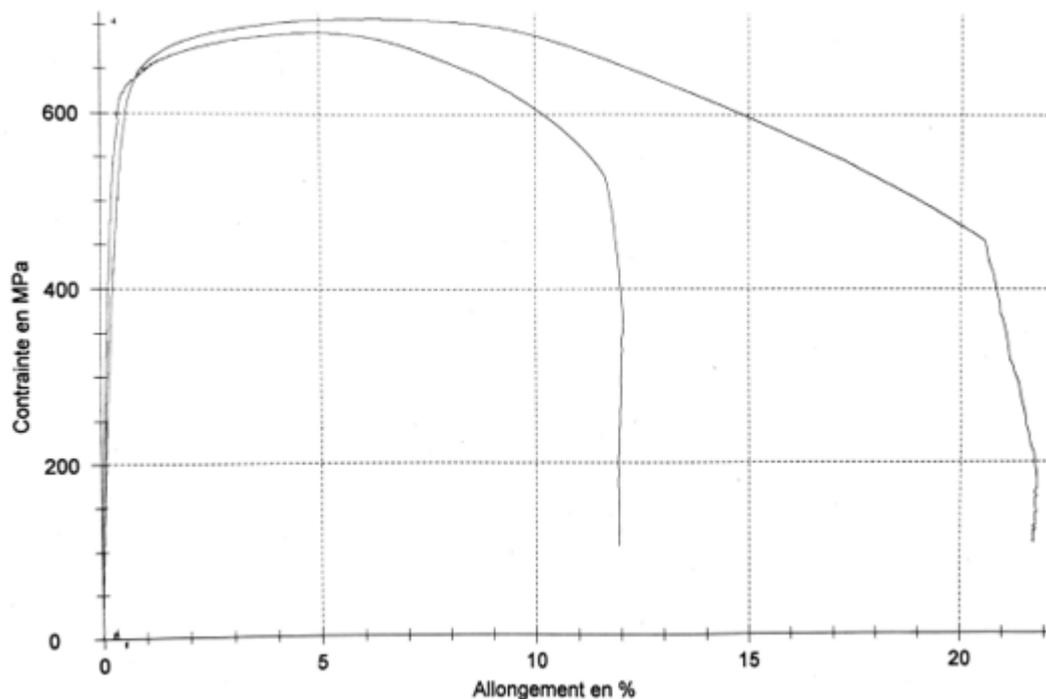


Fig. IV.23 : la courbe de traction pour deux échantillons d'épaisseurs différentes

Date	Epaisseurs (mm)	a_0 (mm)	b_0 (mm)	S_0 (mm ²)	R_m (MPa)	$A_{50.8}$ (%)
14/05/2023	Éprouvette 1 (19.03)	19.03	40.83	766.99	708	21.7
14/05/2023	Éprouvette 2 (14.27)	14.05	39.67	557.36	692	11.9

Tableau IV.10. Résultat d'essai de deux échantillons d'épaisseurs différentes

Dans la première courbe qui correspond à un d'éprouvette 1, la résistance mécanique R_m égal 708 MPa et l'allongement pouvant se poursuivre jusqu'à 21.7%

La deuxième courbe représente d'éprouvette 2 une résistance mécanique $R_m = 692\text{MPa}$, et un allongement pouvant continuer à 11.9 %.

En analysant les résultats, nous constatons que la courbe d'éprouvette 1 présente un rapport d'allongement plus élevé par rapport à la courbe d'éprouvette 2, qui présente un rapport d'allongement plus faible. Cela est dû à la différence d'épaisseur

Notez que les valeurs sont dans la norme API 5L X70 (Tableau IV.5).

IV.5.3. Essais métallurgiques :

IV.5.3.1. Essais de dureté :

Avec l'aide de ALFAPIPE GHARDAIA Les essais de dureté sont réalisés sur le métal de base (MB) et les différentes zones du joint soudé (ZF), (ZAT).

Nous avons réalisées des essais de dureté sur la machine (ZWICK) ZHV10, étalonnée.

Nous faisons les tests sur les 16 points représentés sur la figure ci-dessous.

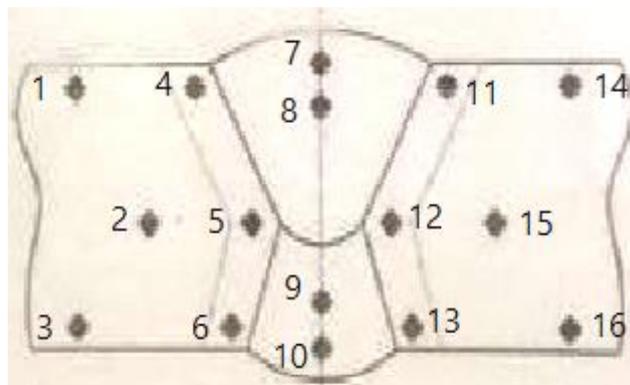


Fig. IV.24 : Epreuves avec joint de soudure bout à bout pour la dureté Vickers
(Acier X70)

Les points (1.2.3.14.15.16) : sont appliqués sur le métal de base (MB).

Les points (4.5.6.11.12.13) : sont appliqués sur la zone affectée thermiquement (ZAT).

Les points (7.8.9.10) : sont appliqués sur le métal de souder (MS).

Tableau IV.7 présente Résultat de l'essai de dureté sur un échantillon

Nr	Zone de test	d _h μm	d _v μm	HV 10
1	Metal de base	294.7	301.2	209
2		301.9	305.3	201
3		296.5	303.2	206
4	ZAT	309.7	315.7	190
5		313.4	313.0	189
6		318.2	311.1	187
7	Zone fondue (ZF)	288.8	294.1	218
8		290.8	294.0	217
9		300.5	295.8	209
10		300.3	289.7	213
11	ZAT	310.2	310.3	193
12		313.5	312.6	189
13		314.3	306.9	192
14	Metal de base	293.4	305.7	207
15		297.6	307.7	202
16		295.2	303.0	207

Tableau IV.11. Résultat de l'essai La dureté

La Fig. IV.19. Présente la courbe dureté sur un échantillon

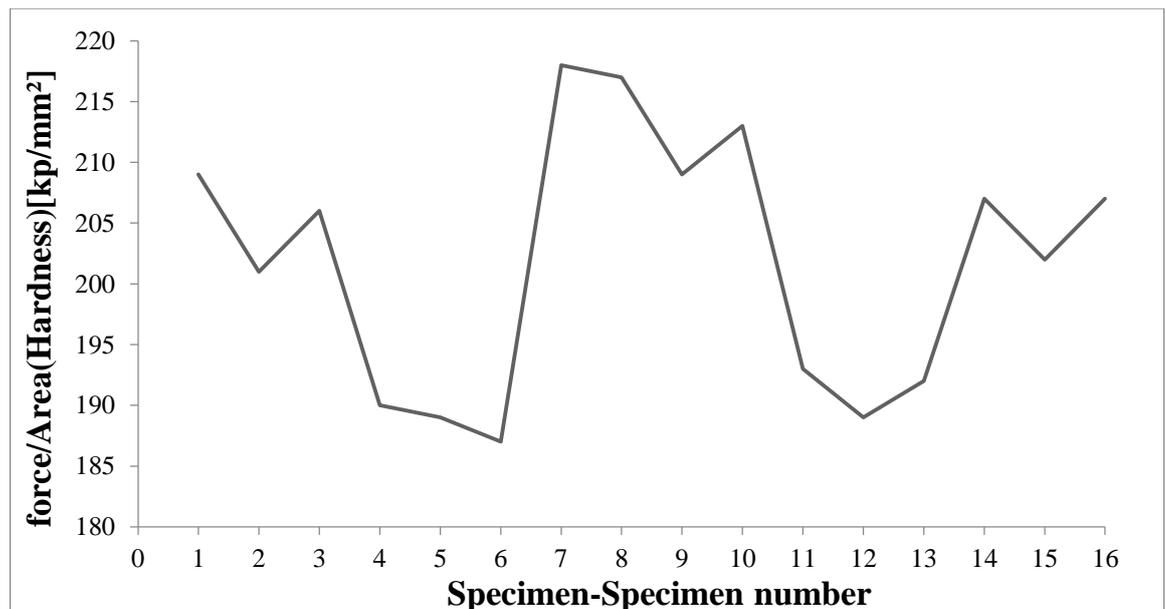


Fig. IV.25 : la courbe dureté sur un échantillon

On constate qu'il existe une légère différence de dureté entre les différentes zones de l'échantillon qui ne dépasse pas 14% (dureté maximale égale à 218 et dureté minimale égale à 187).

Les résultats de dureté sur les différents points sont représentés sur le (Tableau. IV.11). La norme API 5 L exige que la dureté ne doit pas dépasser 50%.

IV.5.4. Essai de traction :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction et cela généralement jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.

Avec l'aide de ALFAPIPE GHARDAIA Nous avons réalisées l'essai de traction sur l'échantillon. Les caractéristiques mécaniques conventionnelles sont représentées sur la figure et le tableau ci-dessous.

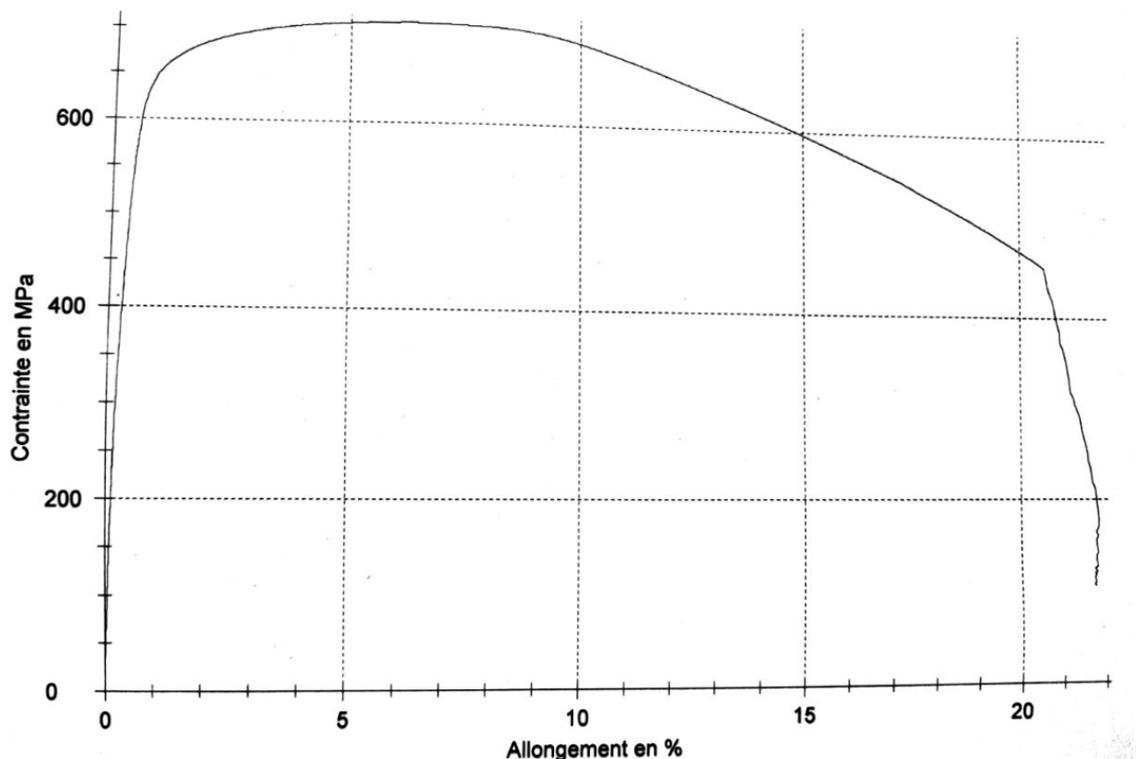


Fig. IV.26 : la courbe de traction.

La (fig. IV.26) représente la courbe de traction. Elle montre que l'acier API5L X70 présente une bonne résistance mécanique R_m qui dépasse 570 MPa et un allongement important qui peut aller jusqu'à 21.7%.

Date	Epaisseurs (mm)	a_0 (mm)	b_0 (mm)	S_0 (mm ²)	R_m (MPa)	$A_{50.8}$ (%)
09/02/2023	Eprouvette X70 19.05	19.03	40.83	776.99	708	21.7

Tableau IV.12. Résultat Essai traction sur la machine ALFAPIPE

D'après les résultats obtenus dans le cadre de ce travail montrés sur le (Tableau IV.12) et la norme API 5 L présenté sur le (Tableau IV.13). On ne constate que les valeurs de la résistance maximale à la traction (R_m), sont situés dans la fourchette proposée par la norme API 5 L. Ce qui nous mène à dire que les résultats de l'essai de traction répondent aux conditions exigés par la norme API 5L.

Nuance : X70	FABRICATION ET CONTROLE SELON LA NORME API5L		
Contrôle destructif *laboratoire mécanique*			
Essai de traction			
Éprouvette	Caractéristiques mécaniques	Valeurs La norme API 5L	
		MIN	MAX
TN traction normale	E0.5	485 MPa	635 MPa
	Rm	570 MPa	760 MPa
	E0.5/R	0.79 %	0.90 %
	A%	22%	/
TS traction sur soudure	Rm	570 MPa	760 MPa

Tableau IV.13. Les normes essai de traction API 5L [26]



Fig. IV.27 : Essai de traction sur soudure

IV.5.5. Essai de pliage :

Un protocole d'essais de pliage sur une éprouvette qui contient un cordon de soudure a été réalisé selon la norme API 5L.

Cet essai a pour le but d'évaluer la capacité de déformation plastique d'un matériau donc de vérifier la ductilité. Et les résultats sont un jugement visuel sur l'aspect de la surface pliée.

Le cordon de soudure est soumis à un contrôle visuel pour la détection d'éventuels défauts.

Après un contrôle visuel sur les éprouvettes de pliage on n'observe pas des fissures dans les zones de soudage externe et interne (Fig. IV.29)



Fig. IV.28 : Exemple de fissure après le pliage

Fig. IV.29 : Essais de pliage
(Aucune fissure après le pliage)

IV.6. Conclusion :

Ces tests sont considérés comme des tests destructifs.

Les méthodes expérimentales sont axées sur une caractérisation du comportement mécanique et analyse chimique de l'acier API 5L X70 utilisé dans le transport du gaz. Nous avons commencé par une analyse chimique pour déterminer la composition chimique de notre matériaux, suivie d'une description des éprouvettes et du dispositif expérimental ayant permis de mener des essais de traction sur des éprouvettes normalisées. Une étude de résilience et de dureté a été aussi faite.

Les contrôles destructifs des tubes soudés en spiral viennent consolider la qualité du produit fabriqué par ALFAPIPE.

A la fin de ce chapitre, nous ne constatons que les résultats obtenus dans le cadre de ce travail (analyse chimique, traction, résilience, et essais de dureté). Sont conformes aux normes internationales et répondent aux conditions exigés par la norme API 5L.

Conclusion Générale :

À la lumière de nos investigations, nous pouvons conclure que l'effet d'entaille en fatigue est un aspect critique à prendre en compte dans la conception et la fabrication des joints soudés des pipelines. Les entailles peuvent compromettre la résistance et la durabilité des joints, augmentant ainsi le risque de défaillances prématurées.

Il est essentiel de mettre en place des mesures préventives pour minimiser l'impact des entailles sur la résistance à la fatigue des joints soudés. Cela peut inclure une sélection appropriée des matériaux, une optimisation des paramètres de fabrication, une inspection rigoureuse des joints soudés et une surveillance continue de la performance des pipelines.

En outre, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour approfondir notre compréhension de l'effet d'entaille en fatigue dans les joints soudés des pipelines. Cela pourrait inclure des études plus approfondies sur les mécanismes de propagation des fissures, l'optimisation des paramètres de conception et l'évaluation de nouvelles techniques de soudage pour améliorer la résistance à la fatigue des joints soudés.

Le stage et le mémoire réalisés au sein de l'entreprise ALFAPIPE ont permis de tirer les conclusions suivantes concernant le contrôle qualité lors de la fabrication des tubes en acier :

Pour mesurer la dureté, Nous avons utilisé 16 mesures normaliser dans 5 tests dans différentes zones. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans le métal de base (MB) et la zone fondue (ZF), tandis que les valeurs les plus faibles ont été observées dans la zone affectée thermiquement (ZAT) en raison du traitement thermique de la soudure. Cependant, la différence de dureté entre les trois zones n'est Pas grande.

l'entaille transversale facilite le processus de fracture par rapport à la l'entaille longitudinale, et cela est dû à la concentration des contrant lors de la traction la nature de l'entaille peut jouer un rôle significatif dans le changement des résultats de résistance mécanique R_m et de l'allongement (A) lors de l'essai de traction.

L'essai de traction a révélé que notre acier présente une résistance mécanique élevée (R_m) et une capacité d'allongement significative.

Le pliage est appliqué uniquement aux échantillons contenant le cordon de soudure, et aucun défaut de surface n'a été observé lors de l'inspection visuelle.

Conclusion Générale

En conclusion, l'effet d'entaille en fatigue dans les joints soudés des pipelines fabriqués par "ALFAPIPE Ghardaïa" est un sujet complexe et crucial. Une compréhension approfondie de ce phénomène et des mesures appropriées pour le gérer sont essentielles pour assurer la sécurité.

Références

Référence :

- [1] - SACI. T et KHIRI.O., « Calcul à la rupture d'une poutre simple isotrope pré-fissurée, chargée en flexion 3 et 4 points », Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme, Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi, 2018.
- [2] - MR. MBENCHERI., « Evaluation Numérique De La Ténacité JIC Pour Un Acier A508 AISI (16MND9) », Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018.
- [3] - BELMOKHTAR. A., « Contribution au développement d'un modèle de propagation pour la prédiction de la durée de vie en fatigue », Mémoire pour l'obtention du diplôme en Post-Graduation Magister en génie mécanique Ecole Doctorale : Mécanique des Matériaux & Structures, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen ,2013.
- [4] - HADJAJ. S et RIAZI. A., « Facteur d'intensité de contrainte d'une structure fissurée », Projet de Fin d'Etudes, Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib.2022.
- [5] - TAGHEZOUT. A., « Analyse des problèmes d'élasticité plane dans un milieu fissures par la méthode des éléments finis étendus (XFEM) », these de doctorat de 3eme cycle, Université Mustapha Stambouli Mascara, 2020.
- [6] - MOUSSAOUI. M., « Etude et modelisation de la resistance a la rupture sur des eprouvettes entaillees », Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en science, Universite constantine 1,2015.
- [7] - SAIDI, H.E et OULD AHMED.M, A., « Calcul du facteur d'intensite de contrainte par abaqus pour une fissure centrale et une fissure debouchante » memoire de master, Université Saad Dahlab BLIDA 1 ,2016
- [8] - BAILEK. F et YAICHI. M., « Modelisation des structures fissurees a la mecanique de la rupture», Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme, Université Ahmed Draia Adrar, 2017.
- [9] - BETTAHAR. B et MESSOUSA. F., « Effets d'une inclusion sur le comportement en rupture d'une plaque présentant une fissure latérale. » Mémoire de fin d'études, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2020
- [10] - ABDULKADER. Z., « Endommagement par Fatigue et Prédiction de la durée de vie des Joints Soudés de Type Caisson », Thèse Pour obtenir le grade de Docteur, l'Université de Lorraine, 2012.

Références

- [11] - PIGNEAUX.D., « Effet doentaille en fatigue dans les joints soudés en aciers », These Pour obtenir le grade de docteur, Universite de metz, 2002.
- [12] - MANSOURI. A., « Simulation de la fatigue en flexion plane d'éprouvettes entaillées en utilisant solidworks et ansys : Etude comparative », Memoire de master, Ecole nationale polytechnique, 2014.
- [13] - ZALT.A., « Endommagement par Fatigue et Prédiction de la durée de vie des Joints Soudés de Type Caisson », Thèse Pour obtenir le grade de Docteur, l'Université de Lorraine, 2012.
- [14] - TURCAN, G.O., « Sensibilité des métaux ferreux à l'effet d'entaille en fatigue », mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maitrise, Université de montréal, 2011.
- [15] - TOUGGUI.Y et HOUASNIA.I., « Etude de la maintenance d'un pipeline dégradé par un type de fissure », Projet de Fin d'Etude En vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique, Université saad dahleb Blida1, 2016.
- [16] - HACHICHA.W., « Developpement d'un modèle d'estimation des coûts d'assemblages soudés », Mémoire en vue de l'obtention du mastere, L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2004.
- [17] - Web Site <https://www.canambridges.com/fr/connaissez-vous-le-procede-de-soudage-a-larc-submerge/> .27/04/2023.
- [18] - Web Site <https://www.soudeurs.com/metallurgie-du-soudage-et-soudabilite/7023-soudure-nuance-api-5l-x70.html> . 29/04/2023.
- [19] - Web Site http://elearning.univ-biskra.dz/moodle2019/pluginfile.php/80592/mod_resource/content/1/livre-CM%20Vol-10%20chap7.4%20Calcul-joints-soud%C3%A9s.pdf .30/04/2023.
- [20] - FRIH.I., « Dimensionnement mécano-fiabiliste des structures soudées contenant un défaut », Thèse pour l'obtention du grade de docteur, Universite de technologie de troyes, 2016.
- [21] - photo sur Google.
- [22] - documentation ALFAPIPE GHARDAIA
- [23] - BOUCHELLIGA. H., « Identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l'acier X70 D'ALFAPIPE », Memoire presente en vue de l'obtention du diplome de master, Universite badji mokhtar annaba, 2016.

Références

[24] - MERARDA. H., «Tribologie et Lubrification des Systèmes Mécaniques », document, Université de Ghardaïa, 2023.

[25] - BEN KECHROUD.B «Etude comparative de quatre aciers pour pipeline pour Sonatrach réalisés à la TSS Arcelor Mittal-Annaba selon les paramètres physico chimique et choix de l'acier X52 », PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2014.

[26] - MEHALLI, M.B et BENAMOR.E « Identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l'acier X70 D'ALFAPIPE », MEMOIRE Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Master 2, Université Kasdi Merbah Ourgla, 2020.