

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par

OULADBRAHIM ABDELMOUMIN

SOUIDA MOHAMED

Filière : Hydrocarbures

Option : Mécanique des Chantiers Pétroliers

Thème

***Etude expérimentale et simulation numérique de l'effet de
différents types de défauts sur le comportement mécanique de
l'acier API 5L X70***

Devant le jury :

Mr. GACEB MOHAMED	Prof	UMBB	Président.
Mr. BELAIDI ABDERRAHMANE	MC/A	UMBB	Examineur.
Mr. GUEBLI ABDELHAMID	MC/B	UMBB	Examineur.
Mr. BETTAYEB MOURAD	MC/B	UMBB	Encadreur.

Boumerdès : 2016/2017



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A Ma très chère Mère qui a été toujours à mes côtés ;

A Mon Père qui m'a toujours guidé et soutenu ;

A tous mes frères et sœur pour leur soutien morale

A mes amis avec lesquelles j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie et mes amies qui ont toujours encouragé ;

A mes amis de la résidence universitaire bouhri boualem INH de boumerdes ;

A toutes la familles Ouladbrahim ;

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin et qui me connais.

O.Abdelmoumin





Dédicaces

Grâce à Dieu, ce mémoire à été réalisé.

C'est avec une très grande joie que je dédie ce travail à :

Mes très chers parents qui m'ont donné la vie, l'espoir, l'amour et m'ont soutenu durant mes études.

Que dieu m'aide à leur rendre un peu de tout ce qu'ils ont fait pour moi.

- *A tous ceux qui m'ont encouragé pendant les moments les plus difficiles.*
- *A mes très chers frères et sœurs.*
- *A messieurs : M^r BETTAYEB Mourad pour leurs aides et encouragements.*
- *A mes meilleurs amis : sarsab, salah, taher, ahmed, sohaib.*

A tout le groupe MACP12 Et surtout à mon binôme OUALEDBRAHIM ABDELMOUMIN et tous les enseignants de la FHC.

A Tous ceux que j'aime et je respecte

SOUIDA Mohamed



Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre promoteur consultant M^r BETTAYEB Mourad pour nous avoir dirigé tout au long de ce travail, pour sa compréhension, sa patience, sa compétence, et ces remarques qui nous ont été précieuses.

Nous tenons à remercier également, notre superviseur l'ingénieur BOUHAFS Abdelkader le Chef Secteur du Laboratoire de Métallurgie et Métrologie au niveau de l'entreprise ALFAPIPE GHARDAIA,

et tout le personnel du laboratoire essais mécanique et chimique de l'entreprise et plus particulièrement messieurs : Mustapha, Chikh, Mokhtar, Hicham, Lamine, Ahmed, pour leur aide précieuse.

Nous tenons à remercier le Centre de Recherche en Technologies Industrielles CRTI, ex – CSC pour les documentations et pour la présentation des conférences internationales sur le soudage et le CND et l'industrie des matériaux et alliages.

Nous présentons nos chaleureux remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

O. Abdelmoumin et S. Mohamed.

Résumé

Le transport du gaz dans des conditions économiques nécessite l'utilisation de pressions de transport élevées, et donc l'utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité. De plus, la sécurité des installations demande une bonne ténacité pour éviter la ruine de la structure par propagation rapide de fissures.

Du point de vue numérique, la propagation de fissure est un problème complexe puisqu'il nécessite de suivre la géométrie de la fissure au cours du temps. L'apparition de défauts d'origines différentes, tels que, ceux engendrés par la corrosion ou le soudage, sont les plus répandus. Etant des foyers de fortes concentrations de contraintes, ces défauts ajoutés aux chargements répétés dans le temps ; peuvent être à l'origine d'endommagements par fatigue, susceptibles d'initier des fissures et causer la rupture des canalisations. Dans la mécanique élastique linéaire de la rupture, le champ de contrainte au voisinage d'un défaut est singulier, cette singularité varie selon la forme et la taille du défaut. Les fissures sont les défauts qui induisent la plus forte singularité ce qui a été prouvé par la théorie de *Griffith*. Ces dernières ont fait l'objet d'étude de notre mémoire, par l'utilisation de l'approche de la mécanique linéaire de la rupture et la méthode des éléments finis.

Mots clés : Pipelines, aciers à haute limite d'élasticité, défauts, fissures, concentration de contrainte, mécanique de la Rupture, FEM.

ملخص

إن نقل المحروقات في ظروف اقتصادية مثالية يستوجب استخدام ضغوط عالية، و بالتالي استخدام صلب عالي التمدد، و حماية المنشآت يتطلب صلابة جيدة من أجل اجتناب انهيار الأنابيب بانتشار التصدع.

من وجهة النظر الرقمية، انتشار التشققات يعتبر مشكلة معقدة لأنه يتطلب متابعة التصدع مع مرور الوقت، تظهر مختلف العيوب بسبب التآكل أو لحام، هذه الأخيرة تعد الأكثر انتشارا. بما أنها تؤثر تركيزات عالية للتوتر و الضغط ، هذه العيوب إضافة إلى الحمولة المتكررة على مر الزمن؛ قد تكون سبب الضرر بالتعب و من المحتمل أن تبدأ الشقوق في التسبب في كسر الأنابيب .

في الميكانيك الكسر المرنة الخطية، حقل الإجهاد على جوانب العيوب يكون له ميزة خاصة وهذا الميزة تختلف حسب الشكل وحجم العيب. الشقوق هي العيوب التي لها ميزة خاصة أقوى والتي تبرهن من خلال نظرية غريفيث، في الأخير قمنا في مذكرتنا هذه باستعمال التقريبي في الميكانيك الكسر الخطية وطريقة العناصر المنتهية في هذه الدراسة .

كلمات المفتاحية: خط أنابيب، الصلب ذو تمدد عالي، العيوب، تركيز الإجهاد، ميكانيك الكسر، نظرية جريفيث، العناصر المحدودة.

Abstract

Transporting gas in a cost-effective manner requires the use of high transport pressures and hence the use of highly elastic steels. Moreover, the safety of installations requires significant toughness to avoid the ruin of the structure by rapid propagation of cracks.

From an analytical point of view, the propagation of cracks is a complex problem since it requires to follow the geometry of the crack over time. The occurrence of defects of different origins, such as those caused by corrosion or welding are the most widespread. Having high stress concentrations, these defects added to the repeated loadings over time may cause damage due to fatigue which may initiate cracks and cause pipe breaks. In linear elastic mechanics of the rupture, the stress field in the vicinity of a defect is singular in character. This singularity varies according to the shape and size of the defect. Cracks are the defects that induce the strongest singularity, which was proved by Griffith's theory. These have been studied in our paper, using the approach of linear mechanics of rupture and the finite element method.

KEY WORDS: Pipelines, high yield strength steels, defects, cracks, stress concentration, Rupture mechanics, FEM.

Sommaire

Dédicaces.....	I
Remerciements.....	III
ملخص.....	IV
Résumé.....	V
Abstract.....	VI
Sommaire.....	VI
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XVI
Introduction générale.....	XVIII

Chapitre I : Présentation L'entreprise ALFAPIPE GHARDAÏA

I.1 Introduction.....	1
I.2 présentation de l'unité.....	2
I.2.1 Historique.....	2
I.2.2 Entendue de la spécification.....	2
I.2.3 Les normes de fabrication de tube.....	2
I.2.4 Objectifs visés par le projet.....	3
I.2.5 Schéma synoptique du procédé de fabrication	4
I.3 La machine à soudé en spirale.....	5
a)Description.....	7
b) Caractéristiques techniques.....	7
c) Fonctionnement de la machine à souder en spirale.....	7
I.4 Le contrôle qualité.....	9
I.4.1 Les contrôles non destructifs.....	9
a) Contrôle visuel.....	9
b) Examen ultra-sons.....	10
c) Radioscopie.....	10
d) Contrôle radiographique.....	10
e) Installation hydrostatique.....	11
I.4.2 Les contrôles destructifs.....	11

I.5 Le revêtement.....	11
I.5.1 Revêtement externe.....	11
I.5.2 Revêtement interne.....	12
I.6 Parc de stockage.....	13

Chapitre II: Généralités sur les aciers et procédés de fabrication des tubes

II.1 Introduction.....	14
II.2 L'acier.....	14
II.2.1 Classification des aciers.....	15
II.2.2 Les aciers ordinaires ou aciers au carbone.....	15
II.2.3 Le soudage des aciers au carbone.....	16
II.2.4 Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés.....	17
II.2.5 Les aciers à haute limite élastique.....	19
II.3 Le Soudage sous flux en poudre.....	19
II.3.1 Description du procédé.....	19
II.3.2 Domaine d'application.....	20
II.4 Les défauts de soudure.....	21
II.5 Procédé de fabrication des tubes des pipelines.....	22
II.5.1 Tubes soudés en spirale.....	22
II.5.2 Tubes soudés longitudinalement.....	23
II.6 Conclusion.....	25

Chapitre III: Eléments de mécanique de la rupture

III.1 Généralités.....	26
III.2 Introduction à la mécanique linéaire de la rupture.....	26
III.2.1 Notion de la mécanique de la rupture.....	27
III.2.1.1 Rappels d'élasticité plane.....	27
a) loi de Hooke.....	27
III.2.2 Notions de mécanique de la rupture en élasticité linéaire.....	29
III.2.2.1 Taux d'énergie disponible G	29
III.2.2.2 Facteur d'intensité des contraintes K	29

III.2.2.3 Concentration des contraintes près d'un défaut.....	32
III.2.3 Application de la method des elements finis à la mécanique de la rupture.....	33
III.3 Méthode des éléments finis.....	34
III.3.1 Principe de base.....	34
III.4 Principales causes de défaillance des pipelines.....	35
III.4.1 Introduction.....	35
III.4.2 Défaillances Des Tubes.....	35
III.4.3 Définition d'une fissure.....	37
III.4.5 Les Fissures dans les tubes cylindriques sous pression.....	37

Chapitre IV : Etude Expérimentale

VI.1 Introduction.....	38
IV.2 Prélèvement d'échantillons des plaques.....	38
IV.3 Composition chimique des aciers X70 utilisés dans ce travail.....	40
IV.3.1 Préparation de l'éprouvette.....	40
IV.3.2 Présentation des résultats.....	40
IV.3.3 l'analyse et l'interprétation des résultats.....	41
IV.4 Essai de traction.....	41
IV.4.1 Préparation des éprouvettes.....	41
IV.4.2 Exécution des essais de traction.....	42
IV.4.3 Présentation des résultats.....	43
a) Sur des éprouvettes contenant le cordon de soudure.....	43
b) Sur des éprouvettes en métal de base.....	43
IV.4.4 Résultats et discussions.....	44
IV.5 Essai de microdureté HV10.....	45
IV.5.1 Principe de l'essai.....	45
IV.5.2 Préparation des éprouvettes.....	45
IV.5.3 Exécution des essais de microdureté.....	46
IV.5.3 Présentation des résultats.....	47
IV.5.4 Résultats et discussions.....	48
IV.6 Essai de résilience.....	49

IV.6.1 Principe de l'essai.....	49
IV.6.2 Préparation des éprouvettes.....	49
IV.6.3 Exécution de l'essai de résilience.....	50
IV.6.4 Présentation des résultats.....	51
IV.6.5 Discussions	51
IV.7 Essai de traction en présence des trous.....	52
IV.7.1 But de l'étude.....	52
IV.7.2 Principe de l'étude.....	52
IV.7.3 Préparation des éprouvettes.....	52
IV.7.4 Présentation des résultats.....	53
IV.7.5 Remarques et discussions.....	57
IV.8 Essai de traction en présence des défauts latéraux de type fissure.....	57
IV.8.1 But de l'étude.....	57
IV.8.2 Principe de l'étude.....	57
IV.8.3 Préparation des éprouvettes.....	57
IV.8.4 Présentation des résultats.....	58
IV.8.5 Comparaison entre les résultats obtenus pour les deux cas d'étude.....	61
IV.8.6 Discussions	63

Chapitre V : simulation par la méthode d'éléments finis

V.1 Introduction.....	64
V.2 Partie 1 : Analyse tridimensionnelle de concentration de contraintes dans une plaque trouée en traction.....	65
V.2.1 Introduction.....	65
V.2.2 Modèle utilisé et matériau analysé.....	65
V.2.3 Résultats et analyse.....	66
V.2.3.1 Distribution des contraintes.....	66
V.2.3.2 Effet du chargement mécanique.....	66
V.2.3.3 Discussions.....	68
V.2.3.4 Resultats.....	69
V.2.3.5 Discussions.....	71
V.2.4 Effet de la taille du trou.....	71
V.2.4.1 Résultats.....	72

V.2.4.2 Discussions.....	73
V.2.5 Effet de la forme du trou.....	73
V.2.6 conclusion.....	75
V.3 Partie 2 : Effet de différents types de défauts sur le comportement	
mécanique d'une plaque en traction.....	75
V.3.1 Introduction.....	75
V.3.2 Problème traité.....	76
V.3.2.1 Définition du problème.....	76
V.3.2.2 Résolution.....	76
V.3.2.3 Résultats.....	78
a) Champ de contraintes.....	78
a-1) Discussions.....	79
b) la contrainte adimensionnelle.....	79
b-1) Discussions.....	80
V.3.2.4 Influence de la forme du défaut sur les valeurs de KI et GI.....	81
a) présentation du résultat.....	82
b) Discussions.....	85
V.3.2.2 Conclusion.....	85
Conclusion générale.....	87
Référence.....	90
Annexe A.....	92
Annexe B.....	97

LISTE DES FIGURE

Chapitre I

Figure I.1 Situation géographique d'ALFAPIPE GHARDAIA [2]	1
Figure I.2 Situation géographique d'ALFAPIPE GHARDAIA par apport au puits de Hassi Messaoud et Hassi R'mel [3]	1
Figure I.3 Schéma synoptique du procédé de fabrication.....	4
Figure I.4 Les bandes en aciers.....	5
Figure I.5 Élément de préparation de bobine.....	5
Figure I.6 Couper les languette de fin de bande.....	6
Figure I.7 Tube préparé à la machine soudé en spirale.....	8
Figure I.8 contrôle visuel par des agentes professionnelle.....	9
Figure I.9 Tube à l'examen ultra-sons.....	9
Figure I.10 Contrôle de la soudure par radioscopie.....	11
Figure I.11 Contrôle de la soudure par radiographie.....	12
Figure I.12 L'épreuve hydrostatique.....	12
Figure I.13 Revêtement extérieur.....	12
Figure I.14 Revêtement intérieur.....	12
Figure I.15 transport des tubes par camion SNTR.....	13

Chapitre II

Figure II.1 Transformation de l'acier dans la zone réchauffée.....	17
Figure II.2 Influence de la température sur les grains [6]	18
Figure II.3 Principe de soudage sous flux en poudre.....	20
Figure II.4 Fissuration à froid [10]	21
Figure II.5 Principe de fabrication des tubes soudés en spirale.....	23
Figure II.6 Croquage.....	24
Figure II.7 Formage en "U".....	24
Figure II.8 Formage en "O".....	24
Figure II.9 (a) : Formage en U, (b) : formage en O et (c) : soudage des tubes en longitudinale [12]	25
Figure II.10 Expansionigure.....	25

Chapitre III

Figure III.1 Les trois modes de rupture.....	31
Figure III.2 Les zones de champs mécaniques.....	31
Figure III.3 défaut elliptique dans une plaque infinie.....	32
Figure III.4 Organigramme présente les grandes catégories d'endommagement.....	36
Figure III.5 Causes des ruptures de pipelines en cours d'exploitation.....	37
Figure III.6 Rupture ductile d'un tuyau de diamètre moyen sous l'effet de la pression interne	37

Chapitre IV

Figure IV.1 Une virole découpée à partir d'un tube.....	39
Figure IV.2 Prélèvement des plaques : (a) en métal de base transversale par rapport au Virole et (b) transversales au cordon de soudure.....	39
Figure IV.3 (a) Plaque "1" totalement en métal de base (b) Plaque "2" contenant le cordon de soudure.....	39
Figure IV.4 Eprouvette utilisée pour la composition chimique.....	40
Figure IV.5 Éprouvettes d'essai de traction : (a) en métal de base (b) contenant le cordon de soudure.....	42
Figure IV.6 (a) Machine de traction. (b) Extensomètre.....	42
Figure IV.7 Courbes d'essais de traction sur le métal de base.....	43
Figure IV.8 Courbes d'essais de traction sur le métal contenant le cordon de soudure.....	44
Figure IV.9 Schéma montrant la surépaisseur du cordon de soudure.....	45
Figure IV.10 Polissage mécanique aux papiers abrasifs.....	46
Figure IV.11 Eprouvette pour l'essai de microdureté.....	46
Figure IV.12 Microduromètre utilisée pour les mesures de la microdureté (Type Vickers)...	46
Figure IV.13 La répartition des points de mesure pour la microdureté.....	47
Figure IV.14 Les valeurs de la microdureté (HV 10) en fonction de la position de mesure....	48
Figure IV.15 Illustration microscopique des zones existantes sur une éprouvette contenant le cordon de soudure.....	49
Figure IV.16 Eprouvette pour l'essai de résilience en V.....	50
Figure IV.17 Machine de résilience.....	50
Figure IV.18 Un refroidisseur.....	50
Figure IV.19 Éprouvettes réalisées pour des essais de traction.....	52
Figure IV.20 Éprouvettes réalisées pour des essais de traction selon différents taille du trou..	53
Figure IV.21 Résultats obtenus des essais de traction pour $\varnothing = 6$ mm.....	54
Figure IV.22 Résultats obtenus des essais de traction pour $\varnothing = 9$ mm.....	54
Figure IV.23 Résultats obtenus des essais de traction pour $\varnothing = 13$ mm.....	55
Figure IV.24 La variation de la limite élastique (R_e) en fonction de la taille du trou.....	56
Figure IV.25 La variation de la limite à la rupture (R_m) en fonction de la taille du trou.....	56
Figure IV.26 La variation de l'allongement ($A\%$) en fonction de la taille du trou.....	56

Figure IV.27 Éprouvettes réalisées pour des essais de traction selon différents longueurs pour la fissure.....	58
Figure IV.28 Résultats obtenus des essais de traction pour $L = 4$ mm.....	58
Figure IV.29 Résultats obtenus des essais de traction pour $L = 7$ mm.....	59
Figure IV.30 Résultats obtenus des essais de traction pour $L = 10$ mm.....	59
Figure IV.31 La variation de la limite élastique (R_e) en fonction de la longueur de fissure ...	60
Figure IV.32 La variation de la limite à la rupture (R_m) en fonction de la longueur de fissure..	61
Figure IV.33 La variation de la déformation ($A\%$) en fonction de la longueur de fissure	61
Figure IV.34 La variation de la limite élastique (R_m) en fonction de rapport $/w$, L/w ...	62
Figure IV.35 La variation de la limite à la rupture (R_e) en fonction de rapport $/w$, L/w	62
Figure IV.36 La variation de l'allongement ($A\%$) en fonction du rapport $/w$, L/w	65

Chapitre V

Figure V.1 Interface ABAQUS 6.16.....	64
Figure V. 2 Représentation schématique du modèle.....	66
Figure V. 3 Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique $P= 100$ MPa.....	67
Figure V. 4 Représentation schématique du modèle avec path.....	68
Figure V .5 Variation des contraintes équivalente de Von Mises et normales pour différentes longueurs X_i le long du ligament.....	69
Figure V.6.a Variation des contraintes équivalente de Von Mises en fonction de la charge appliquée.....	70
Figure V.6.b Variation des contraintes normales en fonction de la charge appliquée.....	70
Figure V.6.c Variation des contraintes normales en fonction de la charge appliquée.....	70
Figure V.6.d Variation des contraintes normales en fonction de la charge appliquée.....	71
Figure V. 7 Effet de la taille du trou sur le niveau et la distribution des contraintes équivalente S_{VM} induites localement dans la plaque autour du trou.....	72
Figure V.8 Variation des contraintes équivalente de Von Mises en fonction des rapports (d/W)	72
Figure V. 9 Variation du facteur de concentration de contrainte en fonction de la taille du trou	73
Figure V. 10 Effet de la forme du trou sur le niveau et la distribution des contraintes équivalentes S_{VM}	74
Figure V. 11 Variation du facteur de concentration de contrainte en fonction de la forme du trou (rapport dx/dy , $d_x=18$ fixe)	74
Figure V.12 Géométrie de la plaque.....	76
Figure V.13 Modélisation par ABAQUS.....	76
Figure V.14 Maillage modèle avec ligne de ligament.....	76
Figure V.15 Maillage de la plaque avec un défaut latéral de type : a/ demi-cercle ; b/ entaille et c/ fissure.....	77
Figure V.16.a Champ de contraintes de Von Mises en fonction du rayon- demi-cercle.....	78

Figure V.16.b Champ de contraintes de Von Mises en fonction de l'angle d'ouverture- entaille	78
Figure V.16.c Champ de contraintes de Von Mises en fonction de la longueur du défaut- fissure.....	78
Figure V.17.a Variation de la contrainte adimensionnelle σ_{yy}/F pour différents rayons du demi-cercle.....	79
Figure V.17.b Variation de la contrainte adimensionnelle σ_{yy}/F pour différents angles d'ouverture de l'entaille.....	80
Figure V.17.c Variation de la contrainte adimensionnelle σ_{yy}/F différentes longueurs de la fissure.....	80
Figure V.18 Exemple de création de préfissure de 0.5mm-cas de l'entaille.....	82
Figure VI19.a Variation de G_I en fonction du rayon du demi-circulaire.....	82
Figure V.19.b Variation de K_I en fonction du rayon du demi-circulaire.....	83
Figure V.19.c Variation de G_I en fonction de l'angle d'entaille.....	83
Figure V.19.d Variation de K_I en fonction de l'angle d'entaille.....	84
Figure V.19.e Variation de G_I en fonction de la longueur de la fissure.....	84
Figure V.19.f Variation de K_I en fonction de la longueur de la fissure.....	85

Annexes

Figure A.1 Interface ABAQUS 6.16.....	87
Figure A.2 Introduction des paramètres du matériau dans le module property.....	87
Figure A.3 Assemblage dans le module assembly, créer une instance.....	87
Figure A.4 Choix du type de calcul dans le module step.....	88
Figure A.5 Choix de la méthode 'contour integral' dans le module Interaction.....	88
Figure A.6 Choix de la taille des éléments. Module mesh.....	88
Figure A.7 Choix du chargement. Module Load.....	89
Figure A.8 Choix des conditions aux limites, cas d'une fissure interne. Module : Load.....	89
Figure A.9 Visualisation de l'évolution de la plaque sous chargement $P=600$ MPa, avec la répartition des contraintes de Von Mises : cas de fissures.....	89

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 Caractéristiques techniques des bobines.....	7
Tableau I.2 Diamètres des tubes et des épaisseurs des parois pour la soudure en spirale.....	7

Chapitre II

Tableau II.1 Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés.....	16
Tableau II.2 Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier [6]	18

Chapitre III

Tableau III.1 Etat de contraintes planes.....	27
Tableau III.2 Etat de déformations planes.....	28

Chapitre IV

Tableau IV.1 La composition chimique de l'acier API 5L X70.....	40
Tableau IV.2 Exigence de la composition chimique pour analyse nuance X70 [2]	41
Tableau IV.3 Résultats des essais de traction sur le métal de base.....	43
Tableau IV. 4 Résultats des essais de traction sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure.....	44
Tableau IV. 5 Principaux essais de dureté [5]	45
Tableau IV.6 Les valeurs de la microdureté (HV 10) pour différents point de mesure.....	47
Tableau IV.7 Les valeurs de l'énergie absorbée pour les différentes zones.....	51
Tableau IV. 8 Les valeurs de la résilience pour les différentes zones.....	51
Tableau IV.9 Résultats obtenus des essais de traction pour différentes tailles du trou.....	55
Tableau IV.10 Résultats obtenus des essais de traction pour différentes tailles du trou.....	60

Chapitre V

Tableau V.1 Caractéristiques mécaniques de l'acier API 5L X70.....	70
---	----

Annexes

Tableau B.1 Spécifications techniques pour l'essai de traction.

Tableau B.2 Spécifications techniques minimales pour l'essai de résilience.

Introduction générale

Introduction générale

A l'heure actuelle, le transport par pipelines représente un grand intérêt et constitue une partie fondamentale pour l'acheminement des hydrocarbures. Parmi les aciers utilisés pour la construction, on trouve l'acier API 5L X70 qui a une place très importante dans l'industrie mécanique, navale et surtout pétrolière. Cet acier a fait l'objet de notre travail, consacré à son étude et caractérisation au niveau de l'entreprise **ALFAPIPE GHARDAIA**.

Assurer l'intégrité des structures et composants industriels de grande taille passe par la considération de la présence de défauts et par la détermination des conditions d'amorçage, de propagation et d'arrêt des fissures dues à la présence de ces défauts.

Dans les secteurs industriels, les canalisations sont employées en tant que moyens les plus économiques et les plus sûres pour transporter du pétrole et du gaz. Cependant, le nombre d'accidents a considérablement augmenté avec le nombre croissant de leur utilisation.

Donc Les canalisations sont des éléments de structures industrielles dont les avaries entraînent des risques pour les vies humaines et l'environnement écologique associé à des pertes d'exploitation avec souvent un préjudice financier qui peut être considérable.

Les tubes peuvent comporter des défauts ou des microfissures, dus au procédé de fabrication, aux accidents de manutention, aux chocs thermiques, etc. Ces défauts peuvent se développer sous l'effet des conditions de fonctionnement du réseau et donner lieu à la formation, dans le temps, de fissures longues qui finiront par provoquer la rupture du tube, et la fuite de gaz. Comme ce genre de réseau est utilisé dans des milieux urbains, une fuite de gaz pourrait aboutir non seulement à des conséquences graves, mais aussi rendre très compliqué le remplacement du tube en matière de temps et de sécurité.

Une bonne compréhension du processus de développement des défauts en microfissures qui donneraient naissance à une fissure longue et le phénomène de propagation de cette dernière, est d'une importance capitale afin de prévenir des catastrophes dues aux fuites de gaz, ainsi que pour la maîtrise de la maintenance du réseau. Dans la perspective de cerner ce phénomène de propagation, nous avons procédé à l'analyse de l'évolution de la fissure dans le cadre de la mécanique linéaire élastique de la rupture. Il consiste essentiellement à l'analyse par simulations, dans le cas de chargement statique dans une partie importante de notre travail.

- **Organisation du mémoire**

Le présent mémoire, comprend une introduction générale, cinq chapitres, une conclusion générale et une partie-annexes. Il est structuré comme suit :

Le premier chapitre I, est consacré la présentation du lieu de stage, l'entreprise ALFAPIPE GHARDAÏA.

Dans le chapitre II, a été consacré aux généralités sur les aciers et procédés de fabrication des tubes

Dans le chapitre III, nous présentons un rappel de quelques éléments de la mécanique de la rupture.

Le chapitre IV a été consacré à l'étude expérimentale, Il se compose de deux parties essentielles. Dans la première, nous avons présenté une caractérisation expérimentale chimique et mécanique de l'acier API 5L X70 afin de mettre en évidence la composition chimique et les caractéristiques mécaniques de l'acier étudié. Dans la deuxième, nous allons présenter une étude détaillée de l'influence de la présence d'un trou circulaire et d'une fissure dans des éprouvettes droites soumises à un chargement de traction sur l'évolution des propriétés mécaniques de l'acier API 5L X70. L'investigation a été étendue à l'effet de la taille du trou et de la longueur pour la fissure sur la limite de rupture.

Le chapitre V présente une étude par simulation numérique, Il se compose de deux parties essentielles, la première traite l'analyse tridimensionnelle de concentration de contraintes dans une plaque trouée en traction. La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'effet de différents types de défauts sur le comportement mécanique d'une plaque en traction, où le logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS dans sa version 6.16 a été utilisé.

Ces cinq chapitres sont suivis d'une **conclusion générale**.

Chapitre I

**Présentation L'entreprise ALFAPIPE
GHARDAÏA**

I.1 Introduction

La société que nous avons choisie c'est la société **ALFAPIPE(GHARDAÏA)**. Elle est implantée dans la zone industrielle de Bounoura à Ghardaia, à 10km du chef-lieu de wilaya, l'usine occupe une superficie de 23000m² et son effectif s'élève en moyenne à 500 employés [1].

Spécialisée dans la production et commercialisation de tube soudé en spirale destiné à la construction de pipeline (gazoduc oléoduc), et aux infrastructures de transfert d'eau et travaux publique.



Figure I.1 Situation géographique d'ALFAPIPE GHARDAÏA [2].



Figure I.2 Situation géographique d'ALFAPIPE GHARDAÏA par rapport au puits de Hassi Messaoud et Hassi R'mel [3].

I.2 présentation de l'unité

I.2.1 Historique

Les puits de pétrole et de gaz se trouvent à proximité de Hassi R'mel et Hassi Messaoud, la tuberie spiral d'El-Hadjar (Annaba) ne peuvent pas seul satisfaire les gros besoins de SONATRACH en matière de transport des hydrocarbures. Il a été décidé de créer cette 2^{ème} unité similaire au 1^{er}.

La mise en chantier de l'unité a démarré en Avril 1974 par une société allemande, et celle entrée en production en 1977 d'une capacité de 120000 tonnes annuelle, d'une équivalence de 375km de tube de 42 pouces de diamètre.

Les machines installées dans cette usine peuvent produire des tubes de 16 à 64 pouces de diamètre, 7,92 à 15mm d'épaisseur et d'une longueur de 7 à 13m.

Les bobines sont transportées par voie ferroviaire d'Annaba à Touggourt où elles sont stockées dans un dépôt d'une capacité de 40000 tonnes, pour être transporté par camion SNTR jusqu'à GHARDAIA (350km). Le transport constitue pour limiter un goulot d'étranglement qui gêne par fois les paramètres de production [4].

I.2.2 Entendue de la spécification

La présente spécification définit les exigences techniques concernant la fabrication, le contrôle (destructif et non destructif) et la fourniture des tubes en acier, destinées à la construction des ouvrages de transport d'hydrocarbures en service non corrosif. L'usine fabriquant les tubes devra bénéficier des certifications API Q1 et API, ISO. Les tubes sont fabriqués selon la norme API 5L 44^{ème} édition et spécifiquement technique du client. Le règlement algérien de sécurité pour les canalisations de transport d'hydrocarbures [5].

I.2.3 Les normes de fabrication de tube

En dehors des dérogations ou des exigences particulières de la présente spécification et/ou de la commande, tous les tubes seront rigoureusement contrôlés suivant les normes API : [5]

- **API:** American Petroleum Institute Standards.
 - API 5L: specification for line Pipe, 44^{ème} édition,
 - API Q1: specification for quality programs.
- **ASME :** American Society for Mechanical Engineers
 - ASME Partie C: Spécification pour baguettes d'apport, électrodes et métaux d'apport.
- **ASNT:** American Society for Non-Destructive Testing ASNT
 - SNT-TC-1A, Pratiques Recommandées pour la Qualification et la Certification du personnel du Contrôle Non Destructif

I.2.4 Objectifs visés par le projet

L'entreprise ALFAPIPE a pour but de transformer les bobines et les produits plats aux tubes spirales pour transporter le pétrole, le gaz, l'eau et tous autres liquides sous haute pression.

✓ **pipeline :**

- oléoducs (transport du pétrole).
- gazoducs (transport du gaz).

✓ **hydraulique :**

- transport d'eau.
- alimentation en eau potable.
- infrastructure hydraulique.
- assainissement.
- drainage.
- soutien puits.

I.2.5 Schéma synoptique du procédé de fabrication [6]

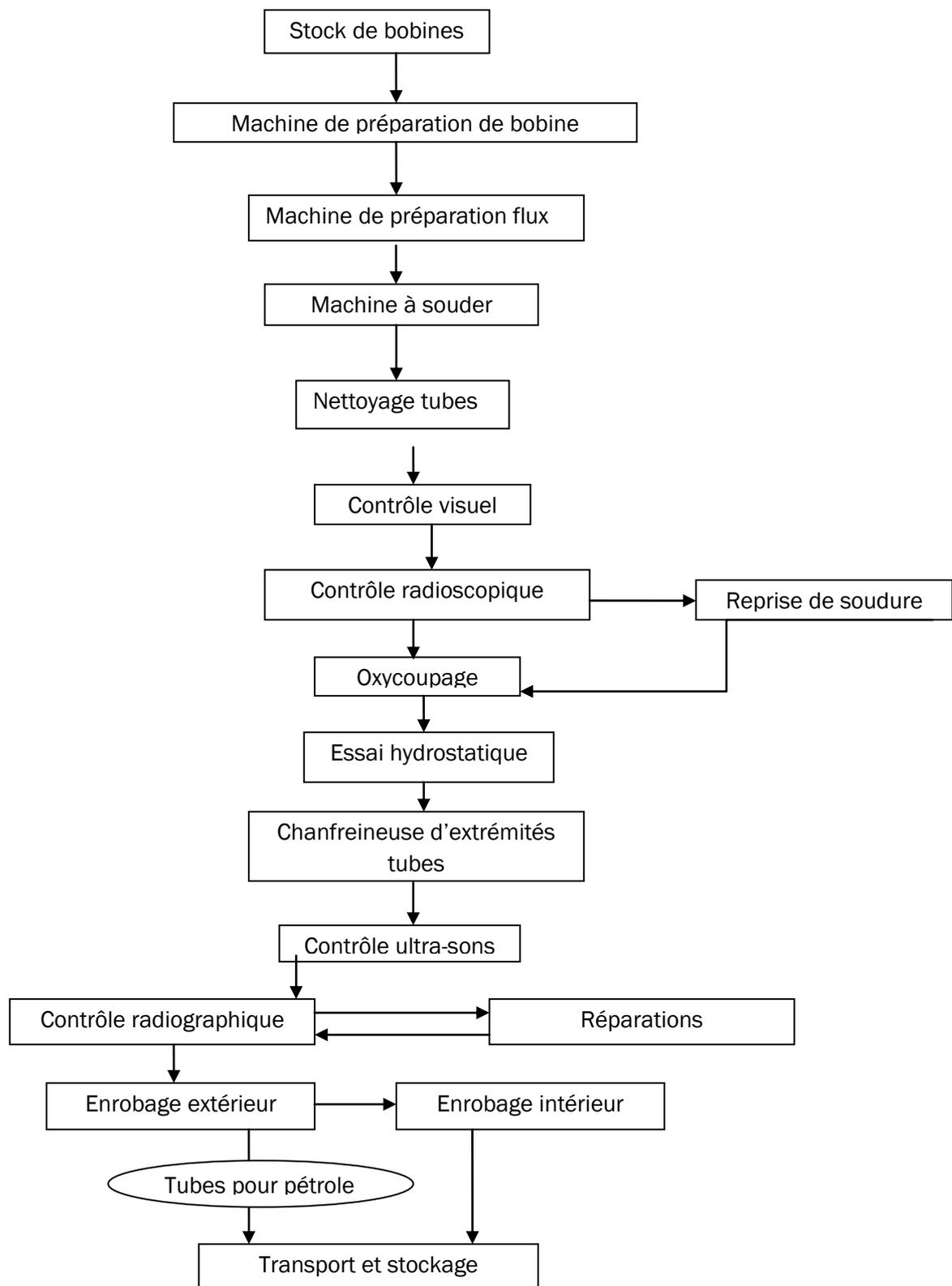


Figure I.3 Schéma synoptique du procédé de fabrication

I.3 La machine à souder en spirale

a) Description

La machine à souder en spirale sert à fabriquer des tubes à partir des bandes de différentes largeurs et épaisseurs dévidés des bobines. C'est bandes sont roulées en hélice et sont ensuite soudées intérieurement et extérieurement selon le procédé de soudure en flux.



Figure I.4 Les bandes en aciers

Ces éléments essentiels sont constituées par :

- élément de préparation de bobine (la bande).
- élément de formage de tube.
- élément de sortie du tube.

L'élément de réparation des bandes : s'étend du dispositif de déroulage des bandes dévidées jusqu'aux rouleaux de l'entraîneur. Dans cette zone la bobine est tirée au travers de la machine et passe par différents stades d'usinage. Elle est dressée, guidée et rongée des deux côtés par la cisaille circulaire de rognage qui fait ensuite.



Figure I.5 Élément de préparation de bobine.

L'élimination des bords de laminage est liée à la mise au point d'une largeur constante de bande. Ensuite à l'aide des outils raboteurs et de brosse de nettoyage, on prépare les rives pour la soudure.

Le rabotage des bobines pour obtenir une sans fin fait également partie de la réparation des bandes. L'opération se fait comme suit :

- couper les languette de fin de bande.
- aligner les rives.
- souder voir.



Figure I.6 Couper les languette de fin de bande

Pendant cette phase d'usinage, la soudure de tube est interrompue, pendant un court laps de temps. Tous les éléments de la partie préparation des bobines sont boulonnés fixés sur le châssis de base de la machine, celui-ci repose sur des galets et il est pivoté dans la position correspondante (angle d'entrée) selon la largeur et le diamètre du tube.

Dans la cage de formage, la bande est formée en tube selon le principe de la cintreuse à rouleaux multiples. Les rives qui convergent dans la cage de formage sont soudées intérieurement d'abord, extérieurement ensuite sur un châssis orientable pour le réglage de la fonte de soudure sont montées la lunette de commande (dispositif de guidage du tube) le support avec la traverse pour l'installation de soudage extérieur et le control aux ultra-sons, et le dispositif de descente du tube.

Le tronçon du tube sortant se réduit à la longueur correspondante par le chariot mobile d'oxycoupage.

Le tube sectionné à longueur voulu, pendant son passage continu, est descendu sur l'installation de transport (grille) est évacuée latéralement hors de la machine.

b) Caractéristiques techniques

Largeur de bande Bande non rongée Bande rongée	630 à 1830mm 600 à 1800mm
Poids de bobine	Max 30MP =30tonnes
Diamètre extérieur de bobine	1200 à 2000mm
Diamètre intérieur de bobine	600 à 820 mm
Angle d'entrée de bobine	18° à 45°
Epaisseur de la paroi du tube	8 à16 mm
Gamme de diamètre du tube	16 à64 pouces
Gamme de longueur du tube	9 à 16 m
Qualité du tube	Acier +fer

Tableau I.1 Caractéristiques techniques des bobines

Diagramme des diamètres des tubes et des épaisseurs des parois pour la soudure en spirale type **R-SSP 1800** [6]

Diamètre des tubes en pouces.	Largeur Max. Feuillard (mm)	Qualité et épaisseur max des parois (mm)			
		X52	X56	X60	X70
16	800	9.52	8.74	7.52	7.52
24	1200	11.13	9.52	9.52	7.52
30	1500	12.70	11.13	11.13	9.52
36	1800	15.88	12.70	12.70	9.52
42	1800	15.88	13.49	12.70	12.70
48	1800	15.88	15.88	13.49	12.70
52	1800	15.88	15.88	15.88	13.49
60	1800	15.88	15.88	15.88	15.88
64	1800	15.88	15.88	15.88	15.88

Tableau I.2 Diamètres des tubes et des épaisseurs des parois pour la soudure en spirale

c) Fonctionnement de la machine à souder en spirale

- ✓ conformément à la largeur de la bande selon l'échelle graduée, la chaise support de la bobine se trouve dans la position requise transversalement à la direction du déroulement de la bobine (bande).
- ✓ le chariot récepteur de bobine est avancé, c'est-à-dire que le dispositif de serrage se trouve face à face.

- ✓ la bobine se trouve dans la machine, la précédente bobine est épuisée, il y a lieu, maintenant, de souder l'extrémité de la bande de la nouvelle bobine, sur l'extrémité (fin) de la précédente
 - ✓ Planeuse avec guide bande.
 - ✓ Cisaille circulaire avec râcheuse.
 - ✓ Support de raclage avec outil de raclage des rives.
 - ✓ Brosse des rives et des surfaces.
 - ✓ Cylindre de l'intérieur, galet de préformage des rives et barre de guidage sont préréglés sur l'épaisseur respectivement, la largeur de la bande.
 - ✓ cage de formage, tête de soudure extérieur avec dispositif de réglage, lunette de commande avec dispositif de réglage de la fente de soudure, dispositif de control aux ultra-sons, chevalet support du tube, chariot d'oxycoupage et dispositif de descente son préréglé sur le diamètre du tube, respectivement sur l'angle d'inclinaison.
- le châssis de la machine est réglé sur l'angle d'entré de la bande.
 - l'arrêt automatique sur le pupitre de commande un est mise en point.
 - les réservoirs à flux pour la soudure spirale et transversale sont remplis.
 - le tambour de fil à souder pour soudure intérieur et extérieur, comme pour le rabotage des bandes, sont équipé de bobine de fin à souder.
 - propane et oxygène pour dispositif de rabotage et chariot d'oxycoupage sont branchés, la veilleuse sur le chariot d'oxycoupage est allumée. L'air comprimé pour les dispositifs de soufflage entre le racleur et la brosse de surface et avant les cisailles circulaires sont branchés. il en est de même pour le raccordement de l'eau de refroidissement du tube sur le dispositif du control aux ultra-sons et l'eau de couplage pour refroidissement du support de soudure (soudure intérieur).



Machine à soudée
Extérieurement.



Machine à soudée
Intérieurement.

Figure I.7 Tube préparé à la machine soudé en spirale

I.4 Le contrôle qualité

Durant toute la phase de production, des contrôles rigoureux et des essais sont effectués à tous les stades de fabrication assurant au final, un produit aux performances élevées, conforme aux normes internationales.

La matière première (acier) et les tubes sont soumis à différents contrôles répartis en deux types

I.4.1 Les contrôles non destructifs

a) Contrôle visuel

Le but est de contrôler visuellement la qualité de soudure intérieure et extérieure par des agents professionnels. S'il existe un défaut le tube sera réparé avant de continuer la fabrication.



Figure I.8 contrôle visuel par des agentes professionnelle

b) Examen ultra-sons

La surveillance interne de la qualité de la soudure spirale a lieu immédiatement après le soudage à l'aide d'installation automatique. Ils existent deux examens aux ultra-sons, l'un est fait pour le contrôle de la soudure, l'autre est fait pour le contrôle et la détection du dédoubleures.



Figure I.9 Tube à l'examen ultra-sons

c) Radioscopie

C'est une installation composée d'un tube de rayon porté par une barre de fer et qui entre dans le tube pendant que celui la tourne hélicoïdalement, cela permet la transmission de l'image sur l'écran. A l'aide de cette installation radioscopie, le contrôleur détecte les défauts signalés auparavant et même cause non signalées en marquant exactement sur l'endroit du défaut et décide si le tube peut être dirigé vers la réception finale ou bien il doit être renvoyé à la réparation d'une soudure non admissible ou au tronçonneur pour la coupe, le cas de dédoubleur irréparable.



Figure I.10 Contrôle de la soudure par radioscopie.

d) Contrôle radiographique

Il existe une même installation à rayon X mais radiographique c'est-à-dire la transmission de l'image sur film qui est après développé et étudié par un contrôleur spécialisé en control radiographique pour voir si le tube n'a subi aucun défaut ni capteur au niveau de la soudure.

Si le tube est bon on passe à l'étape suivant. Si non à la réparation pour régler le défaut.



Figure I.11 Contrôle de la soudure par radiographie

e) L'épreuve hydrostatique

Chaque tube est soumis à une épreuve hydraulique le tube est bloqué entre deux têtes remplis d'eau et soumis à l'aide de pompe haute pression à la pression prescrite, qui correspond à une sollicitation qui voisine la limite élastique. Elle est maintenue pendant un temps fixé.



Figure I.12 L'épreuve hydrostatique

I.4.2 Les contrôles destructifs

Les essais de traction, de pliage, de dureté, et de résilience sont effectués sur des éprouvettes prélevées sur la bobine et sur le tube. Ces essais sont effectués selon la norme API 5L.

Les essais chimiques pour déterminer les taux d'alliage en carbone, soufre, phosphore, silicium, manganèse, niobium, vanadium, titane, etc.

Les contrôles destructifs sont effectués au niveau du laboratoire essais mécaniques et chimiques.

I.5 Le revêtement

Le tube est protégé par deux (02) revêtements (intérieur et extérieur).

I.5.1 Revêtement externe

Ses étapes de l'enrobage externe sont les suivantes :

- Grenailage par jet de grains d'eau.
- Projection d'une couche peinture avec pistolet.
- Enroulement de l'adhésif.
- Enroulement des P.E.



Figure I.13 Revêtement extérieur

I.5.2 Revêtement interne

Les étapes de l'enrobage intérieur sont les suivants [7] :

- Le rinçage des tubes présentant des parties graisseuses et huileuses avec un jet d'eau chaude à haute pression.
- Séchage des tubes rincés ou humides par un bruleur à gaz.
- Grenailage par jet d'acier pour enlever la calamine et l'oxyde et l'oxyde de fer.
- Enrobage des tubes par projection de peinture avec pompe RS, ceci pour faciliter l'écoulement surtout quand ils sont utilisés pour le transport du gaz et des fluides et les préserver contre la corrosion.



Figure I.14 Revêtement intérieur

I.6 Parc de stockage

Transport par camion SNTR jusqu'à la zone du projet.



Figure I.15 transport des tubes par camion SNTR

Chapitre II

**Généralités sur les aciers et procédés
de fabrication des tubes**

II.1 Introduction

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des biens, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés et revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol [8].

L'acheminement des hydrocarbures : produits pétroliers et gaz naturel s'effectue par canalisations en acier depuis leurs gisements vers les zones de raffinage et les centres de distribution et de consommation [9]. On estime qu'en Algérie le réseau de pipelines est estimé à plus de 19599 km en 2013 contre 19063 km en 2012 [10]. Le transport des hydrocarbures par pipeline reste le moyen le plus sécurisant pour acheminer de grandes quantités de pétroles et de gaz, sur de longues distances.

Dans ce qui suit nous allons présenter une définition et une vue générale sur la technologie des pipelines ainsi que leurs principales étapes de construction et de fabrication. Ainsi que les propriétés des aciers et les défauts de soudage.

II.2 L'acier

L'acier de part ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques occupe une place importante dans l'industrie des métaux ferreux, d'où son utilisation dans divers domaines comme dans le transport par canalisations des hydrocarbures (pétrole et gaz Naturel).

Il est utilisé pour la fabrication des pipelines (gazoducs et oléoducs) pour acheminer des quantités importantes d'hydrocarbures sur de grandes distances depuis leurs gisements vers les zones de consommation et de transformation. A nos jours il existe plus d'un million de Km de réseau de pipelines en exploitation dans le monde.

Le réseau en Algérie est évalué à plus de 19599 Km pour des diamètres allant de 8 à 48 pouces (203.2 à 1219.2 mm). Pour leur efficacité ces canalisations doivent répondre à des impératifs de rentabilité et de sécurité. Plus de 95% des aciers utilisés pour les gazoducs sont des aciers Micro-alliés à haute résistance [10].

L'acier est un alliage à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone (de 0,008 à environ 2,14 % en masse). La teneur en carbone a une influence considérable assez complexe sur les propriétés de l'acier, l'alliage est plutôt malléable et on parle de " fer " à très basse teneur en carbone.

Au-delà de 2,14 %, les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte. Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à modifier la résistance mécanique.

On parle d'acier « doux, mi-doux, mi-dur, dur ou extra dur » (classification traditionnelle). On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant sur d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle d'aciers alliés. De plus, on peut encore modifier grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques, on parle alors d'aciers traités.

Outre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales : résistance aux efforts, module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique, dureté, résistance aux chocs (résilience). Enfin les aciers sont pratiquement entièrement recyclables grâce à la filière ferraille.

De ce fait, les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application technique tels que : les équipements publics, bâtiment, moyens de transport, composants mécaniques.

II.2.1 Classification des aciers

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

L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers [11] :

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

Dans notre étude on s'est intéressé aux aciers au carbone, utilisé pour la fabrication des tubes.

II.2.2 Les aciers ordinaires ou aciers au carbone

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80 % de la production des aciers (Tableau II.1). Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06 %). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers.

Nuance	Pourcentage de carbone(C)	Résistance R_m (Mpa) Etat recuit	Emplois
Extra-doux	$C < 0.15$	330-420	Tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie Pièces de forge
Doux	$0.15 < C < 0.20$	370-460	Charpente métalliques, profiles, construction mécaniques, courante, boulons, fils ordinaire
Demi-doux	$0.20 < C < 0.30$	480-550	Pièces de machines pour application mécaniques Pièces ou bâtis moulés, pièces forgées.
Demi-dur	$0.30 < C < 0.40$	550-650	Petites outillage, éléments de machines agricoles, organe de transmission
Dur	$0.40 < C < 0.60$	650-750	Pièces d'outillage d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutelleries, pièce moulées et traités
Extra-dur	$0.60 < C$	< 750	Outils d'usinage et découpe, câbles, ressort

Tableau II.1 Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés

Bien qu'on puisse les obtenir avec des propriétés mécaniques variées, les aciers ordinaires ne répondent pas à toutes les exigences d'utilisation. Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes :

- la trempabilité ;
- la soudabilité ;
- la tenue à chaud ;
- la résistance à l'usure et à la corrosion.

II.2.3 Le soudage des aciers au carbone

Les aciers pour les constructions soudées sont des hypoeutectoïdes et leur teneur en carbone ne dépasse pas la valeur 0,40 %. A côté du carbone, nous trouvons toujours dans l'acier quelques éléments inévitables, dont la présence est due au processus de fabrication et qui sont le Manganèse, le Silicium, le Soufre et le Phosphore.

L'opération de soudage se distingue des opérations métallurgiques classiques par le fait que les vitesses d'échauffement sont très élevées, que les températures maximales des différents points des pièces varient avec leurs distances au joint et que les durées de maintien de ces températures sont très faibles. De plus, les transformations métallurgiques qui apparaissent au refroidissement, dans la zone affectée thermiquement (ZAT) du joint soudé, s'accompagnent de traitements thermiques. L'expérience montre en fait que la structure métallurgique finale en tout point de la ZAT ne dépend pratiquement que de la température maximale atteinte en ce point, et du critère de refroidissement.

Dans le cas du soudage des aciers au carbone, on peut distinguer quatre zones dans les joints, suivant les températures maximales atteintes [8,12] :

1. La zone fondue, pour laquelle la température maximale est supérieure ou égale à la température de fusion ;
2. La zone entièrement austénitique, pour laquelle la température maximale est comprise entre la température de fusion (TF) et la température Ac3 ;
3. La zone partiellement austénitique, pour laquelle la température maximale est comprise entre les températures Ac3 et Ac1 ;
4. La zone influencée, non austénitisée, pour laquelle la température maximale est inférieure à Ac1.

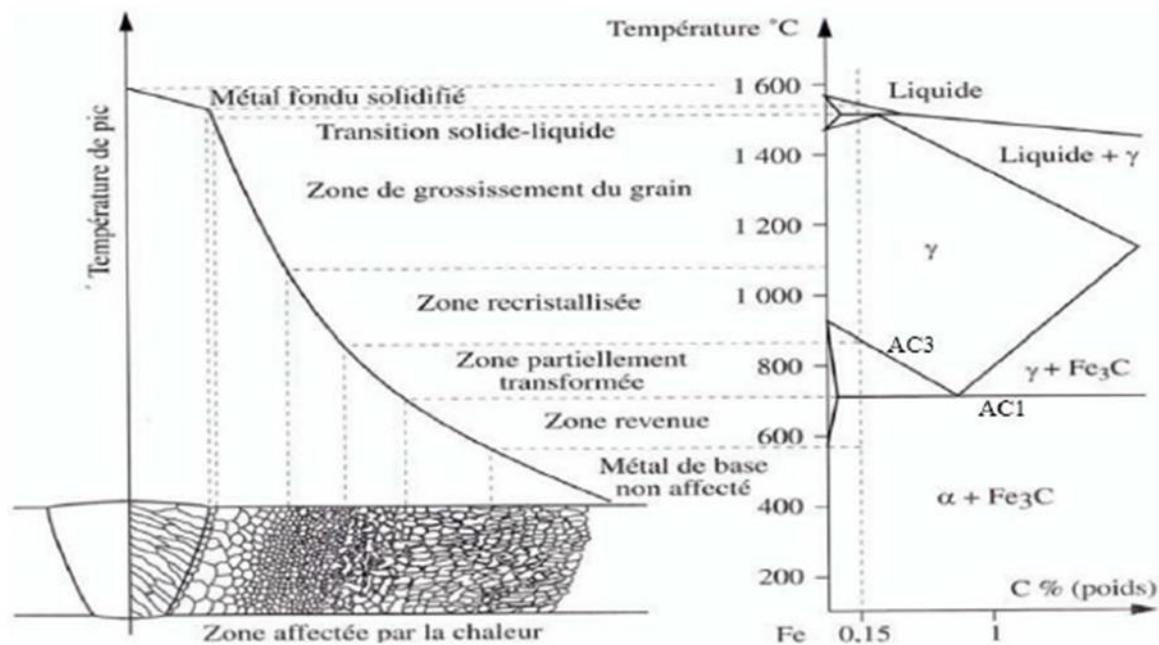


Figure II.1 Transformation de l'acier dans la zone réchauffée

II.2.4 Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés

La soudabilité des aciers dépend de la structure interne du métal dans la ZAT après le soudage. Afin de préserver les qualités du métal à souder, notamment en ce qui concerne la ductilité, le métal soudé doit retrouver une structure interne similaire à son état initial.

La figure II.2 illustre l'effet de la température sur les grains de l'acier, on peut remarquer la zone où on trouve de l'austénite, c'est dans cette zone que, dans le cas où le refroidissement est trop rapide, le métal se solidifie en martensite plutôt qu'en ferrite et en perlite, ce qui crée des tensions internes [13].

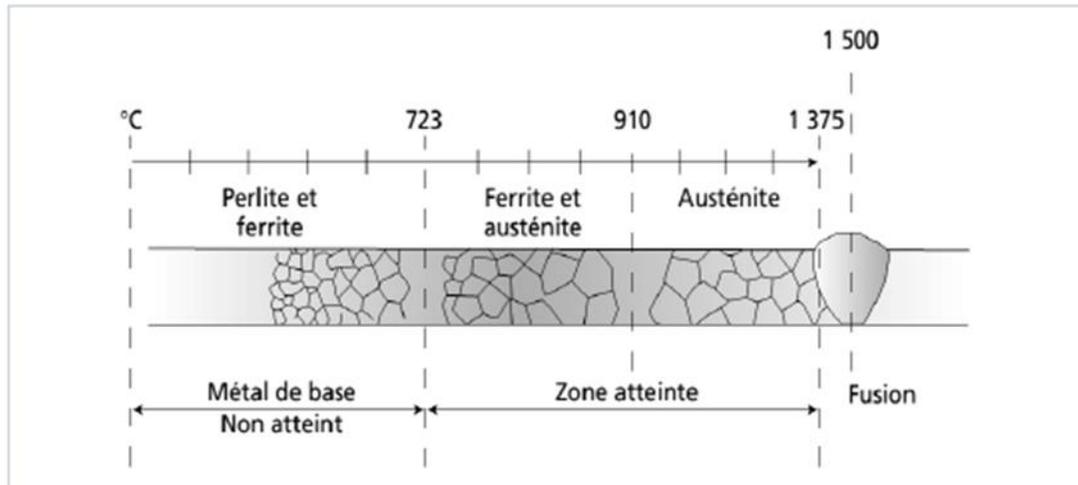


Figure II.2 Influence de la température sur les grains [13]

Les principaux facteurs qui influent sur la soudabilité du carbone sont les suivants:

- Trempabilité : c'est le facteur principal. Il détermine le comportement des aciers lors du refroidissement rapide. Plus l'acier a tendance à adopter une structure martensitique, plus sa fragilité augmente et cela accroît d'autant les risques de fissures.
- Carbone équivalent (CE) : le carbone équivalent est une mesure qui détermine assez bien la trempabilité de l'acier, car plus la teneur en carbone est élevée, plus l'acier est susceptible de subir la trempe. La soudabilité d'un acier est donc dépendante de son carbone équivalent (Tableau II.2).

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	Préchauffage
< 0,40	Excellent	Aucun
0,40 à 0,50	Bon	Aucun De 100 à 300 °C
0,50 à 0,60	Moyen	De 100 à 300 °C De 200 à 400 °C
0,60 à 0,70	Médiocre	De 300 à 400 °C
> 0,70	Mauvais	Non soudable

Tableau II.2 Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier [13]

Les métaux suivants entrent dans le calcul du carbone équivalent : le carbone bien sûr (C), le manganèse (Mn), le silicium (Si), le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le vanadium (V), le nickel (Ni) et le cuivre (Cu).

La formule à utiliser est la suivante :

$$\text{Carbone équivalent} = C + \frac{Mn + Si + Cr}{6} + \frac{Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{13}$$

Dans cette formule, le symbole de l'élément indique son pourcentage de masse dans l'alliage (Par exemple, si on a 0,5 % de carbone et 0,03 % de manganèse, alors C = 0,5 et Mn = 0,03).

Une autre formule d'essence japonaise s'appliquerait à un large éventail de nuance d'acier à haute limite d'élasticité à plus bas carbone (cas des aciers pour tubes) [14] :

$$\text{Carbone équivalent} = C + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

Plus la teneur en carbone est élevée, plus les aciers sont difficiles à souder.

II.2.5 Les aciers à haute limite élastique

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

II.3 Le Soudage sous flux en poudre

Caractères principaux

- ✓ Électrode : fil métallique fusible dévidé d'une façon continue.
- ✓ Protection : apport simultané de poudre composite appelée flux.
- ✓ Courant : continu et alternatif.

II.3.1 Description du procédé

Le soudage à l'arc sous flux en poudre (SAFP) constitue l'automatisation du soudage à l'électrode enrobée. Il associe en effet un fil électrode fusible, dévidé d'une bobine, avec une protection obtenue par des vapeurs provenant d'une poudre composite comparable à l'enrobage et apportée directement dans la zone d'arc, mais indépendamment de l'électrode.

Cette disposition permet de réaliser des soudures ininterrompues multihoraires. Ce procédé est aussi appelé soudage à l'arc submergé (submerged arc welding process ou SAW).

Le soudage sous flux se conduit d'une manière presque exclusivement automatique avec des installations dont le principe est représenté sur la figure II.3 et qui comportent essentiellement [15]:

- ✓ une tête de soudage regroupant la torche proprement dite, l'entraîneur de fil, le dévidoir recevant la bobine de fil, la trémie de poudre et son conduit à la torche ;
- ✓ une source de courant continu ou, dans certains cas, alternatif ;
- ✓ un coffret d'automatisme et des accessoires.

Comme dans toute automatisation, la tête de soudage sous flux est fixée sur un mécanisme selon les deux variantes essentielles : tête fixe, pièce mobile ou inversement. Comme l'indique la figure II.3, le courant est amené à l'électrode fusible par le tube-contact, ou guide-fil, sur les parois duquel elle frotte en permanence.

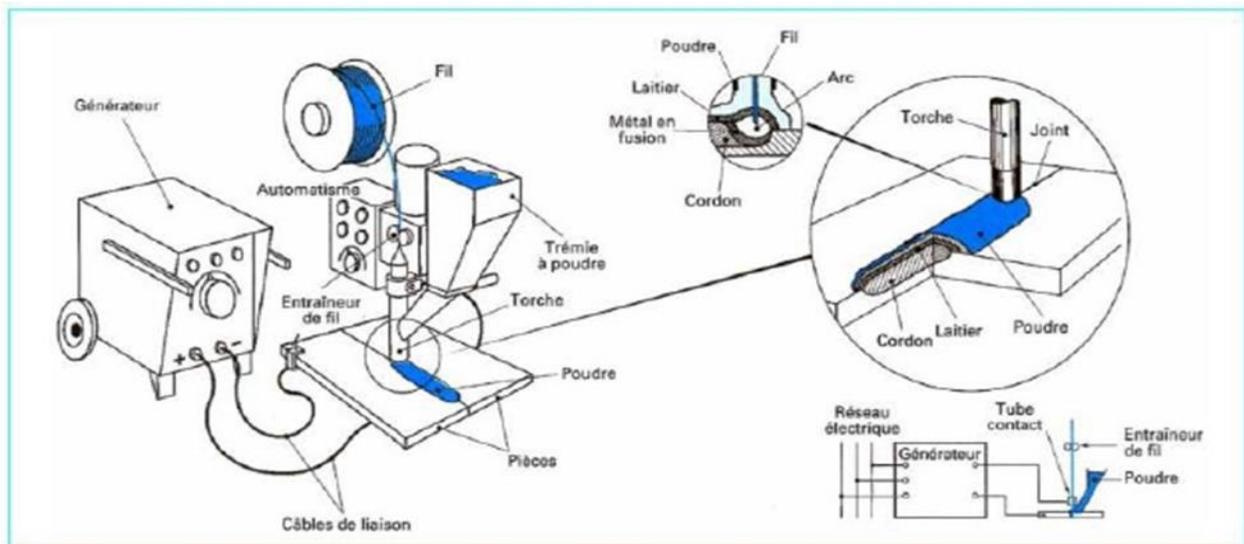


Figure II.3 Principe de soudage sous flux en poudre

II.3.2 Domaine d'application

Le soudage sous flux se place, par rapport au soudage à électrode enrobée, avec pratiquement les mêmes avantages quant à son adaptabilité métallurgique, mais il résout le problème de la productivité par [15] :

- son fonctionnement continu grâce au fil-électrode ;
- son taux de dépôt supérieur ;

Cela le cantonne dans le domaine de la chaudronnerie moyenne et lourde et, de façon générale, dans les applications dans lesquelles :

- les épaisseurs sont élevées (> 30 à 50 mm) et, par suite, les chanfreins importants;
- les soudures sont longues (plusieurs mètres) et uniformes (absence d'angle).

Ce procédé n'est pratiquement pas utilisé manuellement à cause des amenées de flux et de fil qui forment, au niveau de la torche, un appareillage lourd et difficilement manœuvrable. Il se prête, par contre et naturellement, car c'est pour cela qu'il a été développé, à la mécanisation du soudage pour laquelle la position à plat, nécessaire à la retenue du flux, est facile à observer.

II.4 Les défauts de soudure

Une définition possible de ce qu'on entend par défaut pourrait être «Accident géométrique autre que ceux inhérents aux cordons de soudure proprement dits ».

On rencontre donc, toutes les entailles inhabituelles présentées par le cordon de soudure et son voisinage immédiat. On citera, en se référant par exemple à la classification suivante [16] :

- les fissures ;
- les cavités ;
- les inclusions solides ;
- les manques de fusion et de pénétration ;
- les défauts de forme.

✚ **Les fissures :** Les fissures sont des ruptures qui sont provoqués en générale au cours de refroidissement, par des contraintes exercées sur les structures au cours de solidification ou de refroidissement, éventuellement fragilisées, notamment par la présence d'hydrogène.

1. fissure sous cordon ;
2. fissure au raccordement ;
3. fissure à la racine ;
4. fissure transversale ;
5. fissure longitudinale ;
6. fissure longitudinale ;
7. fissure transversale.

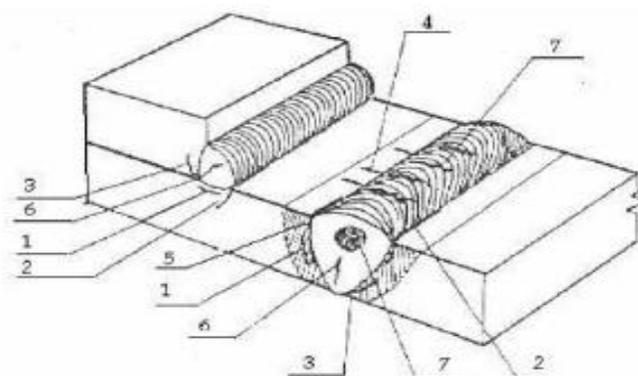


Figure II.4 Fissuration à froid [17]

L'orientation de la localisation des fissures dépend de leur origine. Elles entrent toute fois, d'une manière systématique dans la famille des défauts plans c'est-à-dire des défauts dont l'une des dimensions est très petite devant les deux autres et dont le pourtour constitue, par conséquent, une entaille particulièrement aigüe.

✚ **Les cavités** : appartiennent à la famille des défauts volumiques et peuvent résulter de mécanismes différents. On distinguera :

- ✓ Les retassures : suite à un retrait du métal lors de son refroidissement, l'espace vide formé apparaît visuellement à la surface du cordon, ainsi qu'à l'intérieur du cordon.
- ✓ Les soufflures : formées par des gaz emprisonnés lors de la solidification, qui se présente sous la forme des bulles.

✚ **Les inclusions solides** : constituées de particules de laitier ou d'oxydes.

Les manques de fusion ou collages résultent d'une absence de liaison entre le métal fondu et le métal de base tandis que les manques de pénétration représentent l'absence de fusion des bords à souder lors de la première passe. Ces défauts sont également des défauts plans.

✚ **Les défauts de forme** : sont particulièrement nombreux et on citera, sans y insister :

- ✓ Les surépaisseurs excessives et les effondrements ;
- ✓ Les défauts d'alignement ;
- ✓ Les caniveaux.

II.5 Procédé de fabrication des tubes des pipelines

On retrouve

- Les tubes non soudés ;
- Les tubes soudés en spirale ;
- Les tubes soudés longitudinalement.

II.5.1 Tubes soudés en spirale

La fabrication des tubes soudés en spirale est réalisée en continu sur des machines à souder. Après déroulement de la bobine en bande par un train d'entraînement, la tôle est poussée dans la cage de formage où elle subit une déformation de cintrage sous l'action d'un vérin. L'obtention du formage spirale est réalisée par l'inclinaison d'angle α entre l'axe initial de la bande et l'axe de sortie du tube (figure II.5).

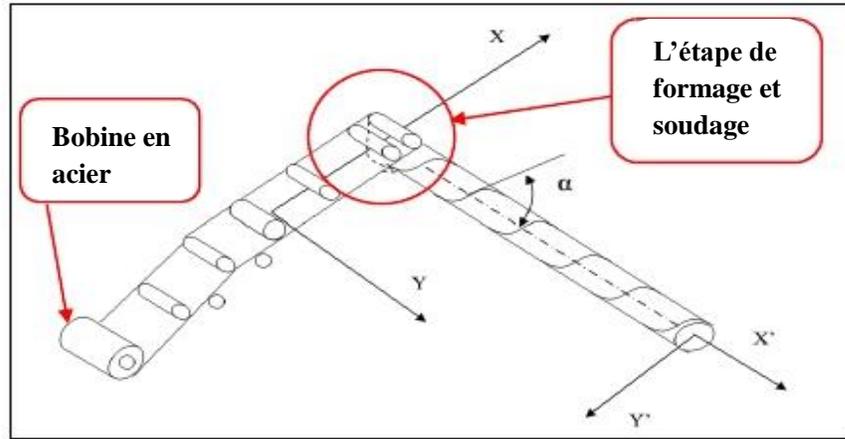


Figure II.5 Principe de fabrication des tubes soudés en spirale

Le processus de formage ou de cintrage du tube est conditionné par l'angle d'introduction de la bande selon la relation [18] :

$$\sin \alpha = \frac{B}{\pi \cdot D}$$

Dans laquelle :

B : est la largeur de bande ;

D : est le diamètre extérieur ;

α : est l'angle d'introduction de la bande par rapport à la tête de forma

Les limites théoriques d'angle ne peuvent, en pratique, pas être exploitées. Si l'angle est trop aigu, il s'ensuit une instabilité du processus de cintrage. Les valeurs limites, pour la fabrication, sont comprises entre 15° et 50°. La gamme des diamètres, dans laquelle les tubes spirale sont fabriqués, s'étale de 400 à 3000 mm environ, avec des épaisseurs allant jusqu'à 30 mm.

II.5.2 Tubes soudés longitudinalement

Les tubes de grand diamètre soudés longitudinalement sont fabriqués selon le procédé "UOE :

Formage en U, en O et Expansion", désignation qui reprend la variation de forme au cours de la fabrication. Le procédé comporte trois étapes principales: formage, soudage et expansion et calibrage. De plus, la première étape est divisée en trois sous étapes: croquage, formage en U et formage en O (Figures II.6.9).

Le formage des gros tubes soudés longitudinalement s'effectue à partir de tôles dont la largeur est voisine du périmètre du tube fabriqué et l'épaisseur égale à celle du tube. La mise en forme de la tôle est réalisée de façon unitaire par croquage des rives et formage à la presse.

Plus précisément, la tôle est cisailée en largeur et chanfreinée. Les rives sont croquées au rayon du tube, soit à la presse, soit par des galets. La tôle est ensuite formée en "U" et "O" par des presses extrêmement puissantes (2000 à 20000 tonnes).

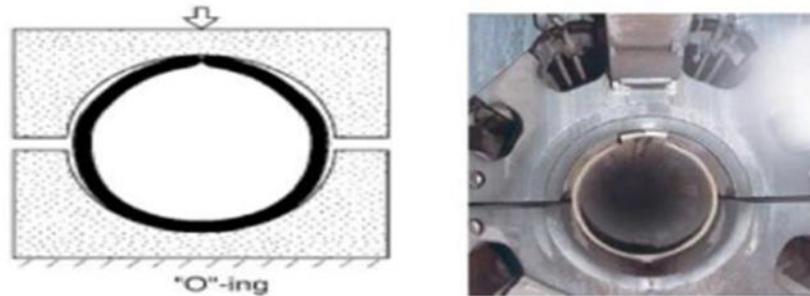


Figure II.6 Croquage

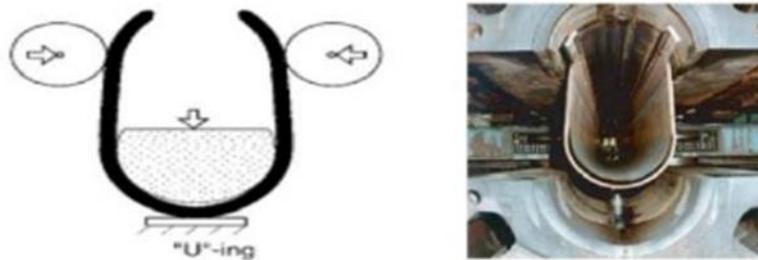


Figure II.7 Formage en "U"

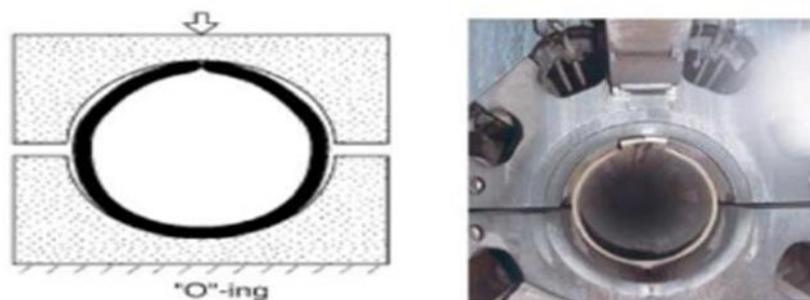


Figure II.8 Formage en "O"

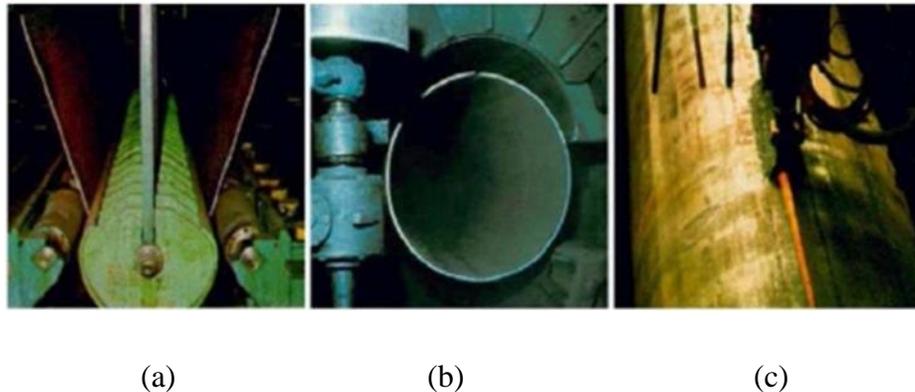


Figure II.9 (a) : Formage en U, (b) : formage en O et (c) : soudage des tubes en longitudinale [19]

Expansion et calibrage

L'objectif de cette opération est d'atteindre des tubes de section parfaitement circulaire, l'augmentation des diamètres par expansion est de 1.5 mm au maximum (Figure II.10).

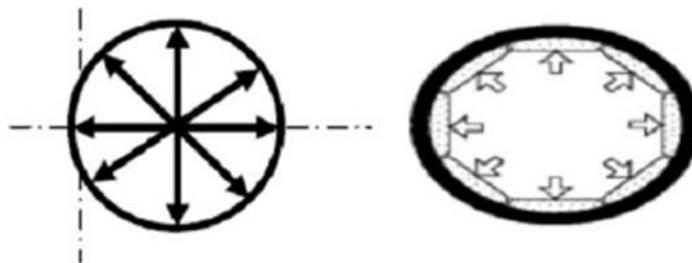


Figure II.10 Expansion

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une définition et une vue générale sur la technologie des pipelines ainsi que leurs principales étapes de construction et de fabrication. Ainsi que les propriétés des aciers et les défauts de soudage.

Dans le chapitre qui suit, nous avons présenté une caractérisation chimique et mécanique de l'acier API 5L X70. Les effets de soudages sur le comportement mécanique de ce dernier seront également traités.

Chapitre III

Eléments de mécanique de la rupture

III.1 Généralités

La séparation en deux parties disjointes d'un corps se produit à la suite de la propagation d'une fissure, qui a vu le développement de microcavités, de microfissures puis de l'amorçage, sous l'action de sollicitations mécaniques, thermiques, chimiques. Lorsqu'un matériau est sollicité jusqu'à la rupture, les essais montrent que la contrainte de rupture σ_R est une grandeur présentant de fortes fluctuations pouvant même dépasser la limite pour certains matériaux et que le mode de ruine dépend de la nature du matériau.

La rupture peut intervenir brutalement quasi sans déformation préalable pour les matériaux qualifiés de fragiles, tandis qu'elle n'intervient qu'après une étape de grande déformation permanente pour les matériaux qualifiés de ductiles. Nous savons maintenant que les matériaux fragiles rompent brutalement au-delà d'une certaine tension, tandis que les matériaux ductiles s'écoulent plastiquement sous cisaillement avant de rompre [20,21].

Le mode de rupture dépend par ailleurs de l'état de contrainte, un matériau qui présente beaucoup de plasticité développera en général des ruptures ductiles, mais pourra être sujet à la rupture fragile. Un matériau sans plasticité (céramiques, métaux à très basses températures, certaines résines) présentera toujours des ruptures fragiles. Donc si la plasticité est absente ou reste très confinée, les théories qui permettent de traiter le problème considèrent le matériau comme élastique partout : *c'est la mécanique linéaire de la rupture.*

III.2 Introduction à la mécanique linéaire de la rupture

La mécanique de la rupture a pour objet essentiel l'étude des fissures macroscopiques : Elle s'applique lorsqu'il existe dans le matériau des discontinuités qui viennent modifier l'état de contrainte, déformation et déplacement, si bien que l'homogénéisation du milieu n'a plus de sens pour décrire le phénomène physique associé à la présence d'une fissure macroscopique. Les notions de la mécanique linéaire de la rupture et le facteur d'intensité de contrainte sont donnés par Griffith et Irwin. Les dates principales qui marquent le développement de la mécanique de la rupture sont 1920, lorsque Griffith montre que la rupture d'un milieu élastique-fragile peut être caractérisée par une variable globale, qui sera appelée plus tard le taux de restitution d'énergie et 1956, lorsque à partir de l'étude des singularités du champ de contrainte, Irwin introduit la notion de facteur d'intensité des contraintes. Les années 1960-1980 sont celles de l'essor puis de la maturité de la mécanique de la rupture, avec en particulier les développements numériques et le traitement des problèmes non linéaires [22].

III.2.1 Notions de la mécanique de la rupture

III.2.1.1 Rappels d'élasticité plane

a. Loi de Hooke

Les équations de comportement (ou loi de Hooke) peuvent être exprimées soit en utilisant le couple des constantes élastiques (E, ν) (E = module d'Young, ν = coefficient de Poisson) soit (μ, λ) , (μ = module de cisaillement et λ = coefficient de Lamé). Ces constantes sont reliées entre elles par les formules [3] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \\ \lambda = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \end{array} \right. \text{ et: } \left\{ \begin{array}{l} \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \\ E = \mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \end{array} \right. \Rightarrow \frac{\nu}{E} = \frac{\lambda}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} \quad \text{(III. 1)}$$

Les deux expressions de la loi de HOOK utilisant ces deux couples de constantes sont :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1 + \bar{\nu}}{E} \bar{\sigma} - \frac{\nu}{E} (\text{trace} \bar{\sigma}) \bar{I} \quad \text{Ou} \quad \bar{\sigma} = 2\mu \bar{\varepsilon} + \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} (\text{trace} \bar{\sigma}) \bar{I} \quad \text{(III. 2)}$$

✚ Etat de contraintes planes : $(\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_z = 0)$

$\varepsilon_x = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_x - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y)$	$\varepsilon_x = \frac{1}{2\mu} \left[\sigma_x - \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} (\sigma_x + \sigma_y) \right]$
$\varepsilon_y = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_y - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y)$	$\varepsilon_y = \frac{1}{2\mu} \left[\sigma_y - \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} (\sigma_x + \sigma_y) \right]$
$\varepsilon_{xy} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{xy}$	$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{xy}$

Tableau III.1 Etat de contraintes planes

✚ **Etat de déformations planes : ($\epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = \epsilon_z = 0$)**

$\epsilon_x = \frac{1 + \nu}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$	$\epsilon_x = \frac{1}{2\mu} \left[\sigma_x - \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} (\sigma_x + \sigma_y) \right]$
$\epsilon_y = \frac{1 + \nu}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$	$\epsilon_y = \frac{1}{2\mu} \left[\sigma_y - \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} (\sigma_x + \sigma_y) \right]$
$\epsilon_{xy} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{xy}$	$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{xy}$

Tableau III.2 Etat de déformations planes

Remarque : On passe des relations (III.1) à (III.2) en remplaçant λ par $\lambda^* = \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu}$ et μ inchangé,

En effet :
$$\frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} = \frac{\lambda}{3\lambda+2\mu} \tag{III.3}$$

On peut donc écrire la loi de HOOK pour les deux états sous la forme :

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{1}{2\mu} \left[\sigma_x - \frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} (\sigma_x + \sigma_y) \right] \\ \epsilon_y = \frac{1}{2\mu} \left[\sigma_y - \frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} (\sigma_x + \sigma_y) \right] \\ \epsilon_{xy} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{xy} \end{cases} \tag{III.4}$$

Avec:

$$\begin{aligned} \lambda^* &= \lambda && \text{En déformation planes} \\ \lambda^* &= \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu} && \text{En contraintes planes} \end{aligned}$$

Le passage de (III.1) à (III.2) peut aussi se faire, avec les variables E et ν , en remplaçant :

ν par $\hat{\nu} = \frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} = \frac{\lambda}{3\lambda+2\mu}$ soit : $\hat{\nu} = \frac{\nu}{1+\nu}$

E Par $E^* = \mu \frac{3\lambda^*+2\mu}{\lambda^*+\mu}$ soit : $E^* = \frac{E(1+2\nu)}{(1+\nu)^2}$ et $\frac{1+\nu^*}{E^*} = \frac{1+\nu}{E}$

III.2.2 Notions de mécanique de la rupture en élasticité linéaire

Nous allons principalement traiter de la rupture fragile au sens macroscopique d'un matériau, c'est à dire une rupture intervenant sans plastification macroscopique notable, ce qui n'exclut pas une plastification microscopique en tête de fissure. Le modèle de rupture fragile suppose que le matériau est homogène et isotrope.

III.2.2.1 Taux d'énergie disponible G

Le lien quantitatif entre la rupture et la taille de défaut a été proposé par Griffith en 1920. Le modèle de Griffith, basé sur un critère énergétique, a prédit correctement la relation entre la résistance du corps élastique - fragile et la taille du défaut. Irwin a ensuite développé cette approche énergétique en introduisant le concept de taux de restitution d'énergie G [23]. On montre que l'équilibre thermodynamique d'une structure élastique, contenant une fissure de surface A , et chargée par des forces, vis-à-vis de l'extension de cette fissure, est réalisé si ce que l'on appelle le taux d'énergie disponible G est égal à une valeur critique G^C . G est défini par la formule:

$$G = \frac{dp}{dA} \quad (\text{III. 5})$$

Avec P énergie potentielle totale de la structure fissurée, c'est-à-dire somme de l'énergie potentielle des forces et de l'énergie élastique emmagasinée, G^C étant l'énergie qu'il faut dépenser pour que la fissure augmente sa surface d'une unité [24]. G , qui peut s'exprimer en J, il s'appelle aussi la force d'extension de fissure. Si G devient supérieur à G^C , la propagation de la fissure se produit, le supplément d'énergie se transformant en énergie cinétique. On démontre que :

$$G = \frac{1}{2} F^2 \frac{\partial C}{\partial A} \quad (\text{III. 6})$$

Avec F : force appliquée,

C : complaisance de la structure fissurée, c'est-à-dire rapport de proportionnalité entre le déplacement provoqué par la force F et cette force F elle-même.

Une des hypothèses fondamentales de la mécanique de la rupture est que la ténacité G^C est indépendante de la géométrie et de la dimension du corps fissuré. La ténacité à la rupture mesurée sur une éprouvette de laboratoire peut être appliquée à une autre structure.

III.2.2.2 Facteur d'intensité des contraintes K

Pour étudier l'état des contraintes dans une zone proche de l'extrémité de la fissure, on considère qu'elle a un rayon de courbure nul à son extrémité et grâce à la théorie de l'élasticité, on montre que les contraintes tendent vers l'infini quand on se rapproche de cette extrémité comme $r^{-1/2}$, r étant la distance à l'extrémité de la fissure. Ce comportement est asymptotique,

en ce sens que si r devient grand par rapport à la dimension de la fissure, des termes en puissance supérieure de r commencent à intervenir pour décrire le champ de contraintes.

La zone où domine le terme en $r^{-1/2}$ est dénommée zone de singularité élastique. Les contraintes y sont de la forme.

$$\sigma_{ij} = \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + 0(r) \quad (\text{III. 7})$$

Avec $f_{ij}(\theta)$: fonction de l'angle polaire par rapport à l'extrémité de la fissure, toujours la même quels que soient la fissure, la pièce et le chargement, $0(r)$ est écrit pour rappeler qu'il existe d'autres termes qui tendent vers 0.

Avec K : Facteur d'intensité des contraintes.

Le facteur K rassemble à lui tout seul l'influence de la dimension de la fissure, des forces appliquées et de la géométrie de la pièce fissurée. Le succès de la mécanique de la rupture provient de ce que les conditions à l'extrémité de la fissure dépendent de ce seul et unique paramètre. Cela permet donc des comparaisons faciles entre éprouvette et structure : il suffit que K soit le même pour que l'état des contraintes à l'extrémité soit identique.

Au moment de la rupture, en particulier, K atteint une valeur critique K_c qui est donc toujours le même et, par conséquent, caractéristique du matériau.

K s'exprime en $\text{N.m}^{-3/2}$ où en $\text{pa}\sqrt{\text{m}}$, l'unité pratique étant le $\text{Mpa}\sqrt{\text{m}}$
($1\text{Mpa}\sqrt{\text{m}} = 0.91\text{ksi}\sqrt{\text{m}}$).

Le déplacement des lèvres de la fissure, lui-même fonction de K , peut être décomposé en trois composantes : parallèle au plan de la fissure et au fond, perpendiculaire au fond de la fissure et parallèle au front de fissure. A chacune de ces composantes correspond un mode élémentaire de rupture, le mode I pour la composante U_1 , le mode II pour la composante U_2 et le mode III pour la composante U_3 figure (III.1). Les ruptures les plus dangereuses se font en général en mode I de sorte que la plupart des études de mécanique de la rupture ont porté sur ce mode. On affecte alors le facteur K de l'indice I.

Les facteurs K_I , K_{II} , K_{III} sont fonction de la longueur de la fissure, de la géométrie de la pièce et du chargement. Par exemple, dans une plaque de très grandes dimensions contenant une fissure de longueur $2a$ et soumise à une contrainte homogène σ :

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (\text{III. 8})$$

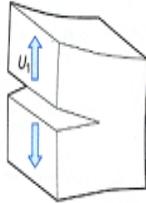
Il est toujours possible de calculer ces facteurs K par la méthode des éléments finis.

Les normes donnent les facteurs K pour les principales éprouvettes préconisées.

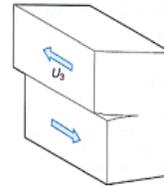
Il existe une relation entre le taux d'énergie disponible G et le facteur d'intensité de contraintes K_I , à condition que la fissure ne dévie pas :

$$E'G = K_I^2 \quad (\text{III. 9})$$

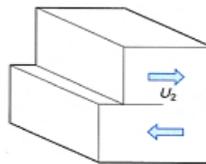
Avec $E' = E$ (module de Young) en contrainte plane, $E^* = \frac{E}{(1-\nu^2)}$ (ν étant le coefficient de Poisson), en état de déformations planes.



Mode I : ouverture



Mode II : mode de déchirement



Mode III : mode de glissement

Figure III.1 Les trois modes de rupture

Dans un milieu élastique fissuré, la région proche de la pointe de fissure peut être décomposée en trois zones (figure III.2) :

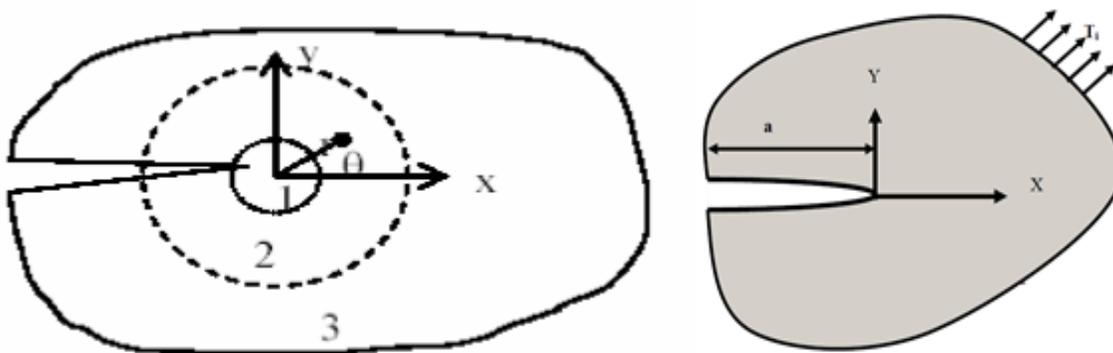


Figure III.2 Les zones de champs mécaniques

- a. **La zone d'élaboration** : au voisinage direct de la pointe de fissure, l'étude de cette zone (considérée comme ponctuelle, d'un point de vue mécanique) est très complexe dans la mesure où les contraintes tendent vers l'infini (d'un point de vue théorique) par rapport à la pointe de fissure ;
- b. **La zone singulière** : dans cette zone, le champ de contrainte présente une singularité en $r^{-1/2}$
- c. **La zone des champs lointains** : extérieure aux deux précédentes, elle raccorde la zone singulière aux conditions aux limites de chargement et déplacement.

III.2.2.3 Concentration des contraintes près d'un défaut

Si on considère un défaut de forme elliptique de longueur $2a$ et de rayon à fond d'entaille ρ figure (III.3), la contrainte locale à l'extrémité a est :

$$\sigma_y = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right) = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (III.10)$$

Dans le cas d'une entaille très aiguë, $\rho \ll a$ et on a alors :

$$\sigma_y \approx 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (III.11)$$

Le facteur $2 \sqrt{\frac{a}{\rho}}$ appelé facteur de concentration de contrainte.

Où : σ_y , σ sont respectivement la contrainte dans la direction y, la contrainte uniforme de traction appliquée dans le plan de la plaque.

a et b sont les demi-axes du trou elliptique et ρ est le rayon de courbure au sommet du trou.

Dans le cas d'une plaque de largeur infinie et comportant un trou circulaire, la relation (III.11) s'écrit :

$$\sigma_y = 3\sigma \quad (k_T = 3) \quad (III.12)$$

Lorsque le rapport b/a tend vers zéro, le trou prend la forme d'une fissure, σ_y tend vers l'infini.

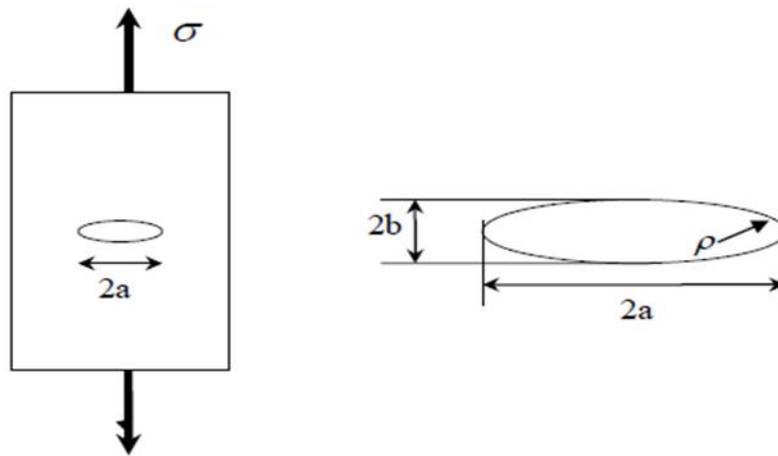


Figure III.3 défaut elliptique dans une plaque infinie

III.2.3 Application de la méthode des éléments finis à la mécanique de la rupture

La détermination des contraintes et déplacements nécessaires pour le calcul du coefficient d'intensité de contrainte K , pour le cas élastique linéaire, et l'intégrale J pour le cas élasto-plastique, constitue une des parties les plus importantes de la mécanique de la rupture. Pour des fissures de géométrie habituelles où la solution analytique ou approchée est connue, on peut proposer au concepteur des listes de formules, des courbes, des abaques nécessaires au calcul.

Pour des fissures de géométrie plus complexe, on doit faire appel à des techniques de calcul numérique comme la méthode des éléments finis, c'est une méthode standard pour l'analyse numérique des problèmes de la mécanique de la rupture.

Plusieurs techniques ont été proposées pour l'évaluation de K et de J à partir de l'analyse par élément finis. Toutefois, la représentation adéquate de la singularité au fond de la fissure constitue toujours un problème commun de ces méthodes.

L'utilisation de la méthode des éléments finis dans l'étude de la fissuration prend en compte deux considérations distinctes [25]:

✚ La modélisation de la singularité au fond de la fissure

Les premières études utilisant la méthode des éléments finis en mécanique de la rupture, ont utilisé des éléments qui nécessitent des maillages extrêmement fins au voisinage du point singulier, pour représenter les singularités des champs de contraintes et de déformations d'une manière convenable. Cependant, pour une analyse efficace des problèmes de fissuration, il est avantageux de développer des éléments de fissure spéciaux pour modéliser directement les singularités au voisinage du fond de la fissure.

✚ L'interprétation des résultats de l'analyse par élément finis

Après l'analyse par éléments finis, un moyen doit être trouvé pour l'évaluation des facteurs d'intensité de contrainte à partir des résultats des champs de contraintes et de déplacements. Plusieurs méthodes ont été mises en œuvre pour ce type de calcul. L'approche la plus évidente est de relier la solution analytique des champs de contraintes et déplacements au voisinage du point singulier aux résultats obtenus, où on utilise des procédures d'extrapolation pour trouver les facteurs d'intensité de contrainte. On trouve aussi d'autres méthodes, qui relient le facteur d'intensité de contrainte au taux de restitution d'énergie associé à un avancement infiniment petit de la fissure. Il existe une autre approche, qui consiste à calculer les facteurs d'intensité de contrainte à partir de la valeur d'une intégrale indépendante du contour d'intégration, comme l'intégrale J de Rice.

III.3 Méthode des éléments finis

III.3.1 Principe de base

La méthode des éléments finis permet de trouver une solution approchée d'un problème régi par un système d'équations aux dérivées partielles avec les conditions aux limites dans un domaine de volume Ω . Les étapes de la méthode des éléments finis sont les suivantes:

- ✚ Le choix d'une fonctionnelle du champ de déplacement $\Pi(u)$ qui est l'énergie de déformation totale de la structure sous les sollicitations extérieures.
- ✚ Division du volume Ω en N sous-domaines de volume Ω_e qui se connectent entre eux au droit des nœuds. Ces sous domaines sont appelés éléments finis.
- ✚ Dans chaque élément, on choisit un champ de déplacement $u(x)$ qui vérifie à priori les conditions de compatibilité dans le volume et la frontière. On dit que ce champ est cinématiquement admissible.
- ✚ Par la continuité de $u(x)$ à travers les interfaces, on réalise l'assemblage de tous les éléments adjacents pour obtenir une structure globale. On obtient alors une approximation de $u(x)$.

Cette approximation tend vers les solutions exactes $u(x)$ lorsque N tend vers l'infini et cette convergence est assurée sous certaines conditions de régularité de la forme des éléments du champ de déplacement.

- ✚ En Introduisant les conditions aux limites, la solution du problème est celle qui minimise la fonctionnelle $\Pi(u)$. Ceci entraîne l'équation :

$$[K]\{q\} - \{g\} = 0 \quad (\text{III.12})$$

qui représente l'équation d'équilibre discrétisée aux nœuds.

où :

$[K]$ est la matrice de rigidité globale.

$\{g\}$ est le vecteur de force globale.

$\{q\}$ est le vecteur de déplacements nodaux du système.

Ce système est déduit du principe du minimum de l'énergie de déformation totale .

III.4 Principales causes de défaillance des pipelines

III.4.1 Introduction

Dans l'industrie pétrolière, l'endommagement des pipelines et des réservoirs est bien constaté.

Il est dû aux conditions de service et aux paramètres d'environnement. Les structures conçues pour les produits pétroliers, sont affectées par plusieurs types d'endommagement érosion, corrosion, fragilisation... Il est de type : fissure, entaille, trou, défaut de géométrie complexe, ...etc.

Tous les aciers pour pipeline peuvent connaître des défaillances à cause des forces externes ou internes, comme les contraintes mécaniques et thermiques, ou à cause de phénomènes connexes comme le fluage, la fatigue et l'érosion.

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

II.4.2 Défaillances Des Tubes

Parmi les paramètres influant le comportement en fatigue des pipelines et des structures, on trouve trois grandes catégories représenté dans l'organigramme suivant (figure III.4).

Les causes des défaillances des tubes ou tuyaux sous pression sont de diverses natures, elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite « fissure ». La plupart de ces défaillances sont causées par des piqûres de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contrainte, mais il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage. Les mouvements de terrain (glissements du sol, tremblement de terre,...) peuvent aussi être la cause de dommage sur tubes enterrés (figure III.5). Les exploitants des tubes étudient ces problèmes depuis longtemps et possèdent une bonne connaissance des méthodes permettant de les gérer.

Les problèmes d'amorçage des fissures en fatigue et les ruptures émanant de concentrations de contraintes sont à l'origine de plus de 90% des ruptures en service. La présence d'une discontinuité géométrique telle qu'une entaille va provoquer l'affaiblissement de la résistance à la rupture du tube. Puisqu'elle va réduire la section du ce dernier en le rendant plus sensible à la pression de service et aux efforts causés par les mouvements des sols, ensuite un effet d'amplification locale de la contrainte va croître la dangerosité de ce défaut.

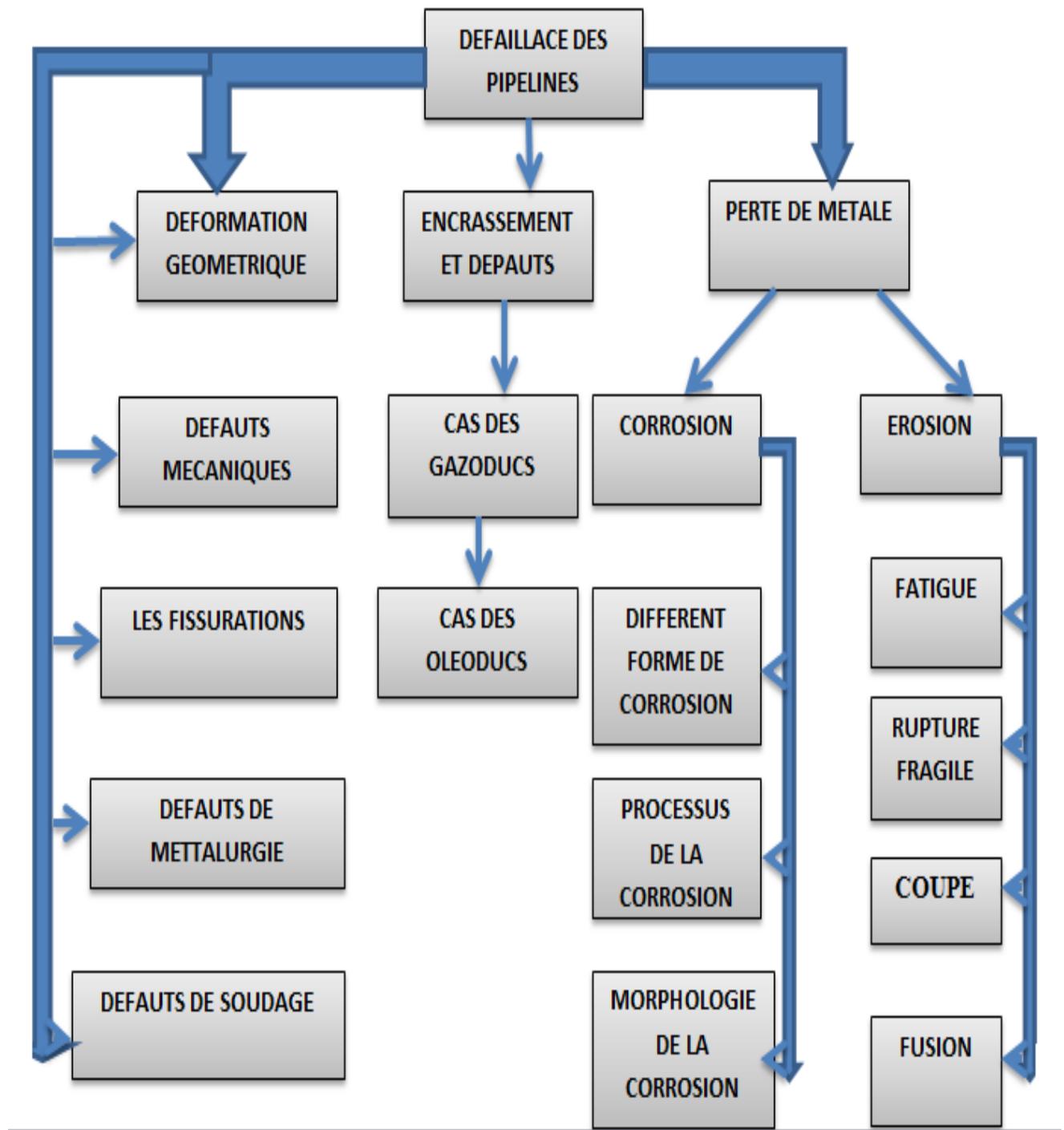


Figure III.4 Organigramme présente les grandes catégories d'endommagement

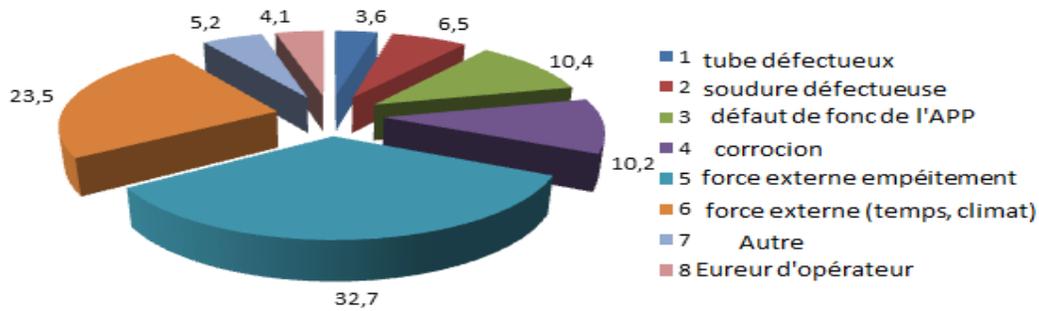


Figure III.5 Causes des ruptures de pipelines en cours d'exploitation [25]

III.4.3 Définition d'une fissure

Une fissure est définie comme la surface séparant localement un solide en deux parties. Le champ des déplacements est alors discontinu à travers cette surface. L'objet de mécanique de la rupture est l'étude des évolutions de cette surface (propagation de la fissure) en fonction des chargements appliqués et des caractéristiques du matériau constituant. La présence d'une fissure dans une structure présente une flexibilité locale qui affecte la réponse dynamique, d'ailleurs, une fissure de fatigue est une fissure qui s'ouvre et se ferme dans le temps selon les conditions de charge et l'amplitude de la vibration.

III.4.5 Les Fissures dans les tubes cylindriques sous pression

La fissuration n'est pas une maladie, mais le symptôme d'une maladie. En effet, la faible capacité de déformation et la faible résistance en traction, compression ou en pression..., rendent les matériaux très sensibles à la fissuration.

L'utilisation de nouveaux matériaux ductiles (acier et autres alliages métalliques) pour des chargements en traction conduit cependant à quelques problèmes ; des ruptures se produisaient parfois pour des niveaux de charges bien inférieurs à la limite d'élasticité ; dans un premier temps des praticiens essayé d'éviter ces risques de ruptures en sur dimensionnant les structures, mais la nécessité d'alléger de plus en plus les structures et de réduire les coûts conduit au développement des recherches sur la mécanique de la rupture.

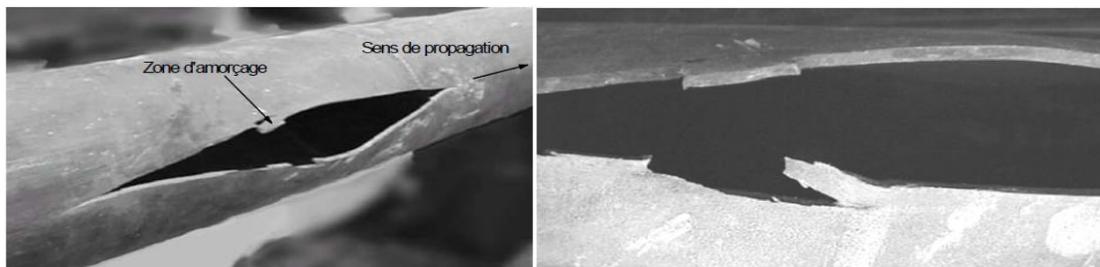


Figure III.6 Rupture ductile d'un tuyau de diamètre moyen sous l'effet de la pression interne

Chapitre IV

Etude Expérimentale

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter toutes les expériences qui ont été réalisées durant notre stage pour le mémoire réalisé, l'objectif principal de ce travail est de valoriser les aciers **API 5L X70 PSL2 SAWH** utilisés par **Alpha pipe de Ghardaïa** pour la fabrication des pipelines, nous avons pris des échantillons en aciers **API 5L X70 PSL2 SAWH** à partir de bobines destinées au soudage de pipelines.

L'acier étudié, est prélevé à partir d'un tube en acier de type **API 5L X70 PSL2 SAWH** destiné pour la canalisation du gaz naturel pour le projet GR7.

Les significations de ces dernières désignations sont comme suit :

- **API:** American Petroleum Institute;
- **5L:** Spécification pour le pipeline;
- **X :** Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance ;
- **PSL2:** les spécifications sont sous forme des intervalles;
- **SAWH:** Submerged Arc Welding Helical.

Le chiffre après le "X" correspond à la valeur de la limite d'élasticité minimale. Par exemple X70 a une limite d'élasticité minimale de 70 ksi (Min=485 Mpa) [26].

L'épaisseur nominale du tube étudié est 12.95 mm et de diamètre 48"(1219.2mm) avec une longueur variable.

Remarques générales

- ✓ Selon la norme API 5L les éprouvettes doivent être préparées conformément à la norme ASTM A 370.
- ✓ L'exécution des essais est suivant la norme API 5L.

IV.2 Prélèvement d'échantillons des plaques

A partir d'un tube nous avons découpé une virole comme illustre la figure IV .1. Ensuite nous avons prélevé deux plaques à partir de cette virole, l'une transversale par rapport à la virole, qui contient seulement le métal de base (Figure IV.2.a), et l'autre transversale au cordon de soudure (Figure IV.2.b).

Les deux plaques obtenues sont illustrées par la figure IV.3.



Figure IV.1 Une virole découpée à partir d'un tube.



(a)

(b)

Figure IV.2 Prélèvement des plaques : (a) en métal de base transversale par rapport au virole et (b) transversales au cordon de soudure



(a)



(b)

Figure IV.3 (a) Plaque "1" totalement en métal de base (b) Plaque "2" contenant le cordon de soudure

IV.3 Composition chimique des aciers X70 utilisés dans ce travail

Le matériau de notre étude est un acier au carbone manganèse utilisé pour le transport des hydrocarbures sous une pression de service de 70 bars de dénomination APIX70, et répond à la spécification imposée par la norme API5L.

IV.3.1 Préparation de l'éprouvette

A partir de la plaque du métal de base nous avons découpé une éprouvette de dimensions $L \times L = 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ (Figure IV.4). L'éprouvette est soumise à un polissage mécanique avec le ruban afin d'obtenir une surface lisse.

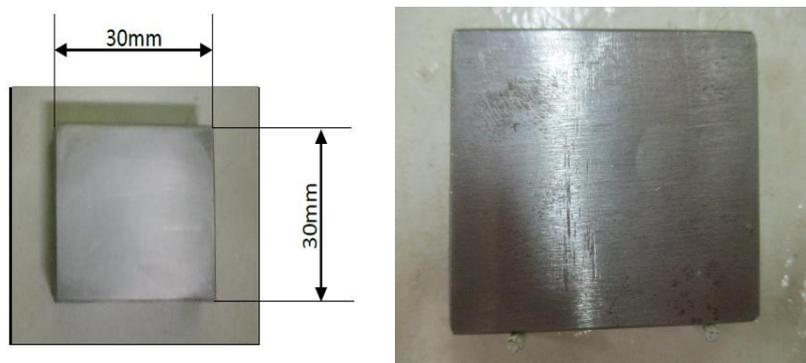


Figure IV.4 Eprouvette utilisée pour la composition chimique

IV.3.2 Présentation des résultats

À l'aide d'un spectromètre à flamme, la composition chimique de cet acier a été déterminée. Le tableau IV.1 représente la composition chimique de l'acier utilisé. La composition telle qu'elle ressort des analyses sur coulée est conforme aux exigences de la norme indiquées au tableau IV.2.

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
l'acier grade API X70.	0,0844	0,374	1,665	0,0131	0,0064	0,0475	0,0068	0,031	0,0393

Co	Cu	Nb	Ti	V	W	B	N	Fe	CE
0,0098	0,0193	0,0515	0,007	0,0874	0,007	0,0014	0,001	97,4	0,200

Tableau IV.1 La composition chimique de l'acier API 5L X70

	C	Mn	Si	Ni	Mo	S	Cu
Min	0.050	1.000	0.150	-	-	-	-
Max	0.140	1.700	0.350	0.250	0.250	0.005	0.080

	V	Nb	Al	P
Min	-	-	0.010	-
Max	0.080	0.040	0.040	0.020

Tableau IV.2 Exigence de la composition chimique pour analyse nuance X70 [27]

IV.3.3 l'analyse et l'interprétation des résultats

- D'après le tableau IV.1, 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.
- Le carbone équivalent (CE) mesuré est au-dessous de la valeur maximale (0,25 %)[28] indiquée par la norme API. Ceci est exigé pour augmenter la soudabilité.
- Les éléments niobium, le titane et le vanadium contribuent à l'amélioration de la limite d'élasticité, la microdureté, la résilience et la soudabilité.
- Le teneur des éléments d'alliage ne dépasse pas 5% [28], donc l'acier API 5L X70 est un acier faiblement allié.

IV.4 Essai de traction

Dans le but de déterminer les courbes charge– déformation et les propriétés mécaniques de l'acier X70, l'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette spécifique [29].

Ont été utilisés en traction simple à température ambiante dans la machine Mohr (ZAWICK) du laboratoire ALFAPIPE. Le matériau initial se présente sous la forme de bobines de la même coulée.

IV.4.1 Préparation des éprouvettes

A partir des plaques a et b, nous avons découpé 3 éprouvettes de largeur 50 mm de chacune. La forme ultime d'une éprouvette d'un essai de traction est obtenue par le procédé de fraisage (Figures IV.5). Le reste des deux plaques vont être utilisées pour les autres essais (microdureté et résilience).

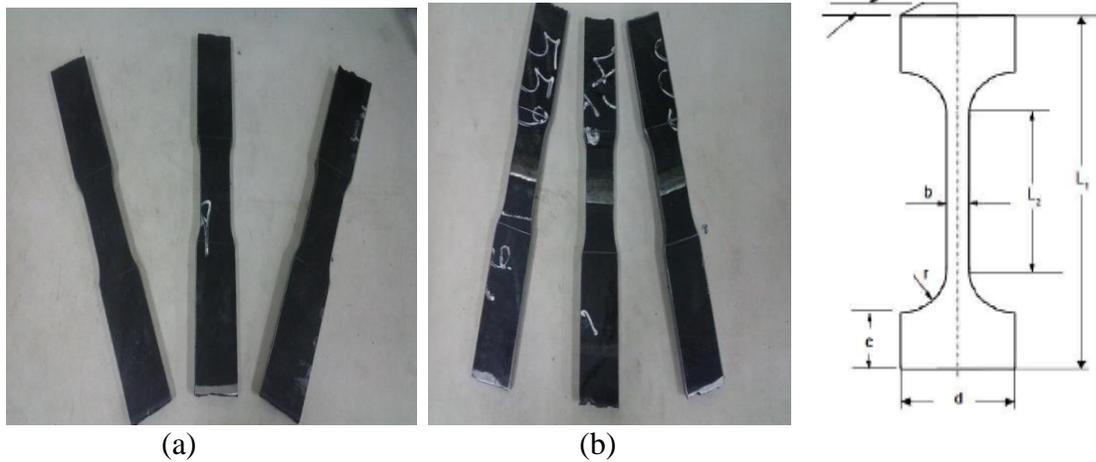


Figure IV.5 Éprouvettes d'essai de traction : (a) en métal de base (b) contenant le cordon de soudure.

IV.4.2 Exécution des essais de traction

Les essais de traction ont été effectués à l'aide d'une machine de traction de type **PROFUND MESS SYSTEM N°8601** (figure IV.6) qui est reliée directement avec un système informatisée pour l'acquisition des données expérimentales.

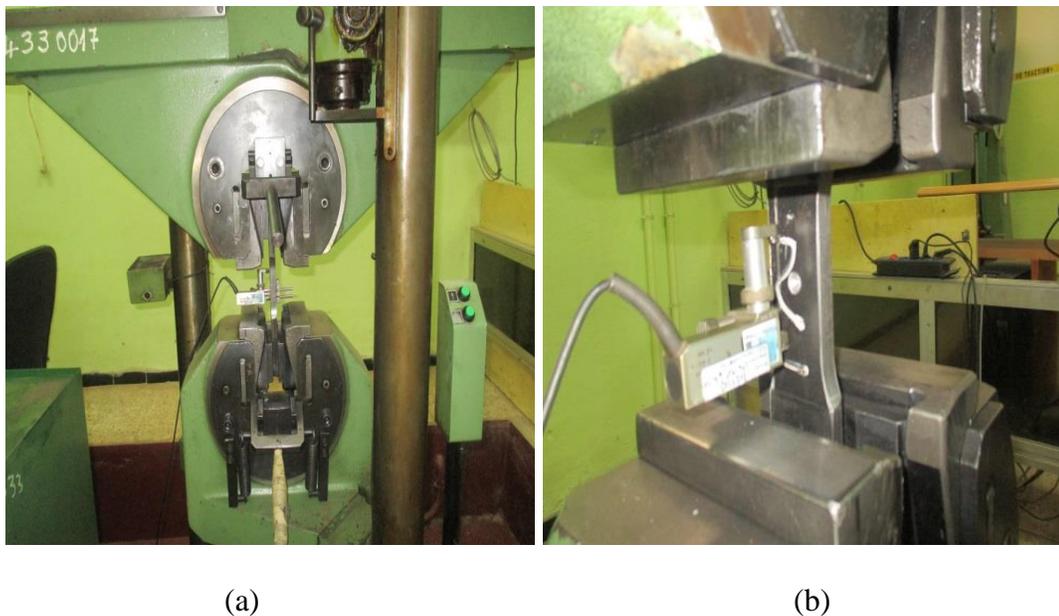


Figure IV.6 (a) Machine de traction. (b) Extensomètre

IV.4.3 Présentation des résultats

a. Sur des éprouvettes en métal de base

Les résultats contrainte-déformation obtenus sur le métal de base sont illustrés par la (figure IV.7) et le tableau IV.3. On peut remarquer qu'il existe une bonne concordance entre les résultats obtenus par les trois tests. Par conséquent, il est préférable de travailler avec la moyenne des trois courbes ou bien utiliser directement les résultats obtenus par le premier test (test1).

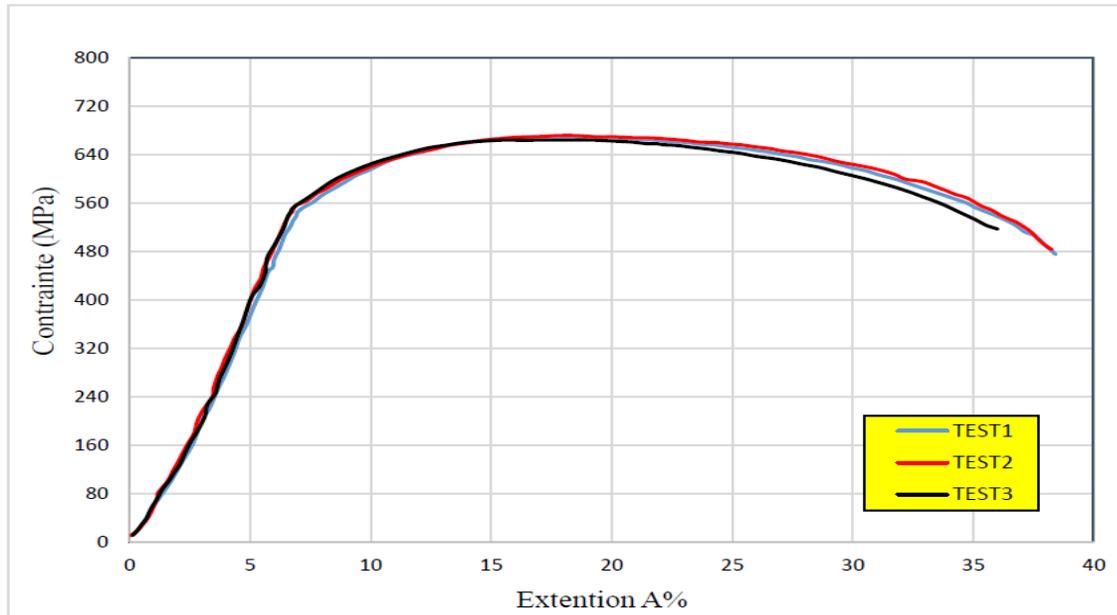


Figure IV.7 Courbes d'essais de traction sur le métal de base

N° d'essai /d'éprouvette	Largeur	Épaisseur	Re(MPa)	Rm(MPa)	A%
1	38,1	13,04	556	670	38
2	38,3	13,05	560	671	37,7
3	38,2	13,04	561	666	37

Tableau IV.3 Résultats des essais de traction sur le métal de base

b. Sur des éprouvettes contenant le cordon de soudure

Les résultats contrainte-déformation obtenus sur le métal contenant le cordon de soudure sont illustrés par la figure IV.8 et le tableau IV. 4. On peut remarquer qu'il existe un bon accord entre les résultats obtenus par les tests 2 et 3 à l'exception du test 1 où une différence assez remarquable a été constatée. Par conséquent, il est préférable de travailler avec la moyenne des

deux courbes des test 2 et 3 ou bien utiliser directement les résultats obtenus par l'un des deux test (test2 ou test3).

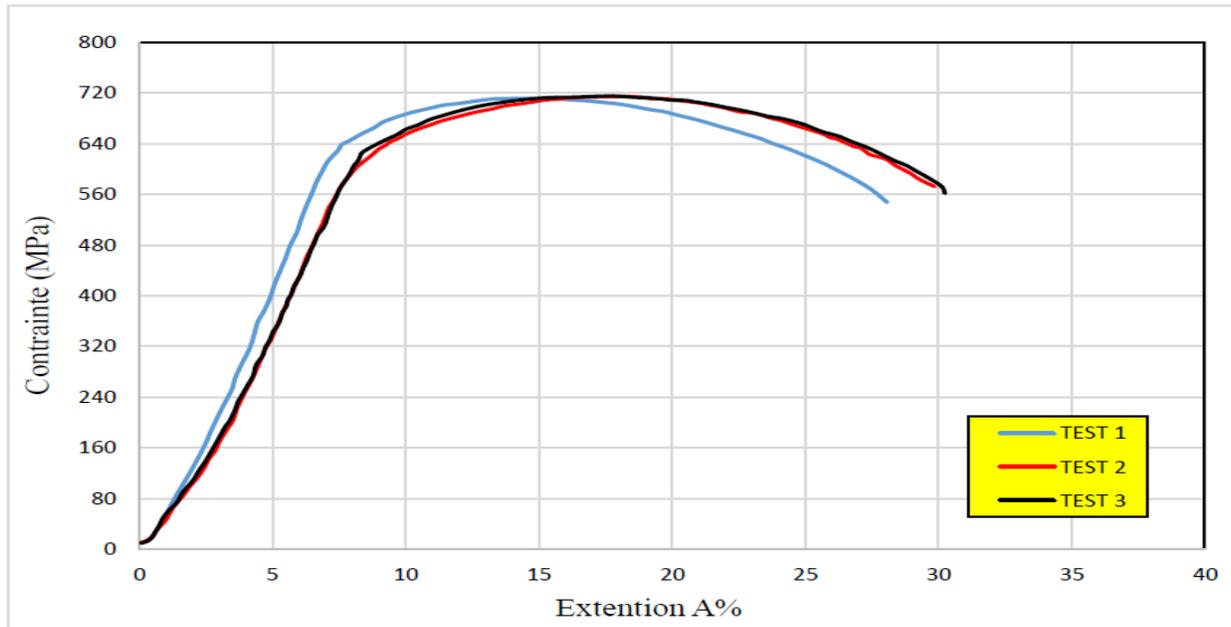


Figure IV.8 Courbes d'essais de traction sur le métal contenant le cordon de soudure

N° d'essai /d'éprouvette	Largeur	Épaisseur	Re(MPa)	Rm(MPa)	A%
1	38,4	12,89	645	713	27,32
2	38,2	12,96	620	714	29,0
3	38,4	12,95	638	716	29,6

Tableau IV. 4 Résultats des essais de traction sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure

Remarque : Zone de rupture localisée dans le métal de base sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure.

IV.4.4 Résultats et discussions

D'après les tableaux IV (3.4), nous remarquons que :

- L'acier API 5L X70 possède des limites élastiques et à la rupture très élevées. Ce qui justifie son utilisation pour la fabrication des tubes des pipelines.
- Pour la traction des éprouvettes qui contiennent le cordon de soudure, la rupture se produit toujours au niveau du métal de base.

- Les R_e et R_m obtenues par les éprouvettes contenant le cordon de soudure sont supérieures à celles obtenues en utilisant des éprouvettes en métal de base uniquement. Cette différence est due principalement à la surépaisseur du cordon de soudure (Figure IV.9).

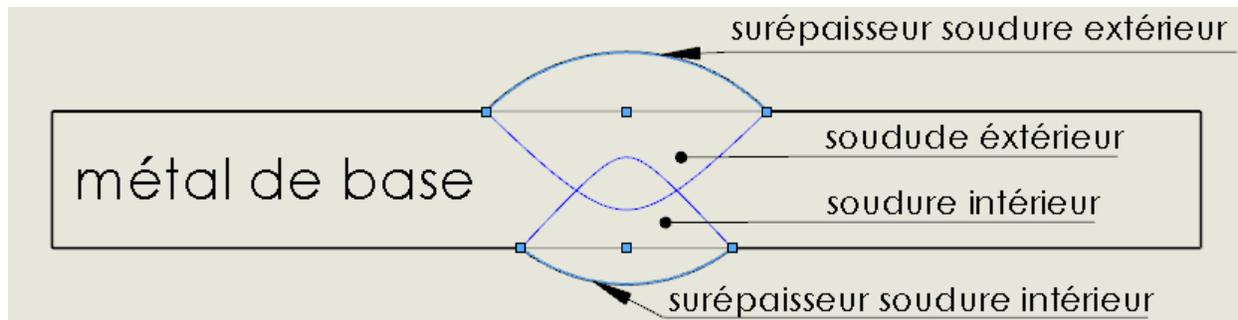


Figure IV.9 Schéma montrant la surépaisseur du cordon de soudure.

IV.5 Essai de microdureté HV10

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, par exemple une bille en acier trempé (dureté Brinell) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers). S'il y résiste bien, il est dit dur, sinon il est dit mou. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.

Pour notre étude on utilise la dureté Vickers.

Essai	symbole	Principe et conduite de l'essai	
Vickers	HV		$H_V = 0.189 \frac{F}{d^2}$ avec $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ (F en N et d_1, d_2 en mm)

Tableau IV. 5 Principaux essais de dureté [30]

IV.5.1 Préparation des éprouvettes

En utilisant le reste de la plaque 2 (plaque qui contient le cordon de soudure), nous avons découpé une éprouvette de dimension 50mm × 30mm (Figures IV.10, 11). Ensuite, nous avons effectué un polissage mécanique aux papiers abrasifs de carbure de silicium jusqu'à l'obtention

d'une surface lisse. Afin de faire apparaître les différentes zones (métal de base, ZAT, cordon de soudure), une attaque chimique avec une solution de Nital (4% d'acide nitrique et 96% d'éthanol) a été effectuée.

Enfin, l'éprouvette a été rincée avec de l'eau pour arrêter l'effet de l'attaque.



Figure IV.10 Polissage mécanique aux papiers abrasifs



Figure IV.11 Eprouvette pour l'essai de microdureté.

IV.5.2 Exécution des essais de microdureté

Les mesures de microdureté ont été réalisées sur chaque zone à l'aide d'un Microduromètre de marque ZWICK N°62108 (Figure IV.12). Cette machine nous permet d'obtenir la microdureté Vickers (**HV10**). Les points de mesure sont répartis comme le montre la figure IV.13.



Figure IV.12 Microduromètre utilisée pour les mesures de la microdureté (Type Vickers)

Les points de mesure sont répartis comme le montre la figure IV.13.

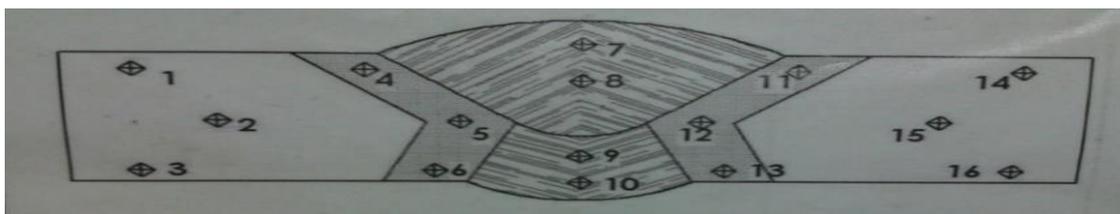


Figure IV.13 La répartition des points de mesure pour la microdureté.

IV.5.3 Présentation des résultats

Les résultats obtenus en faisant des mesures sur différentes zones (voir figure IV.12) sont récapitulés dans le tableau IV.6, en utilisant les notations suivantes pour différencier entre les différentes zones :

MB : Métal de Base.

SE : Soudure Extérieure.

SI : Soudure Intérieure.

Les points/zones	MB	SE	SI
1	212		
2	210		
3	213		
4	201		
5	198		
6	203		
7		230	
8		227	
9			228
10			237
11	195		
12	201		
13	199		
14	217		
15	219		
16	215		

Tableau IV.6 Les valeurs de la microdureté (HV 10) pour différents point de mesure

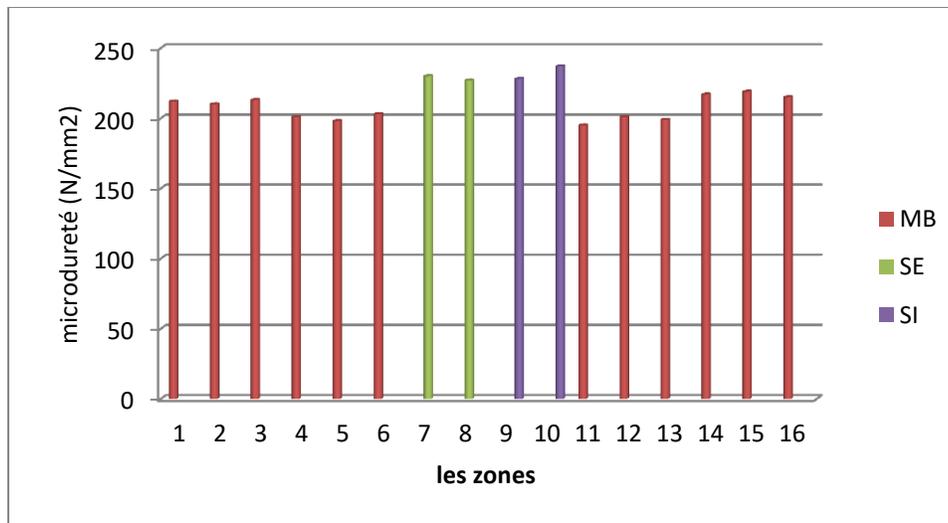


Figure IV.14 Les valeurs de la microdureté (HV 10) en fonction de la position de mesure.

IV.5.4 Résultats et discussions

- La valeur de la microdureté des points 4.MB, 5.MB, 6.MB, 11.MB, 12.MB et 13.MB est nettement inférieure à celle des points 1.MB, 2.MB, 3.MB, 14.MB, 15.MB et 16.MB. Cet écart de valeur de microdureté est dû au chauffage de la zone au cours des passes de soudure (passes intérieure et extérieure). On peut dire que cette zone devient la zone affecté thermiquement (**ZAT**) par rapport à la zone du métal de base (Figure IV.15).
- La figure IV.13. présente une fluctuation des mesures de microdureté. Elle montre bien des pics élevés sur la zone du cordon de soudure dont les valeurs sont 230HV, 227HV, 228HV et 237HV qui sont nettement plus élevées que celles de la zone du métal de base.
- En plus, on peut remarquer également que même dans la zone du cordon de soudure, les valeurs de microdureté obtenues aux points 7.SE et 10.SI sont supérieures à celles de 8.SE et 9.SI. Cette supériorité peut être attribuée au mode de refroidissement, qui est relativement rapide sur les zones externes en contact de l'air en comparaison avec les zones internes au coeur du cordon.

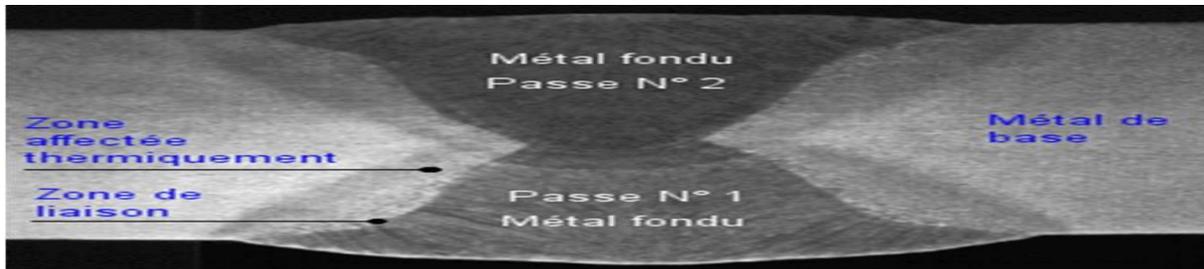


Figure IV.15 Illustration microscopique des zones existantes sur une éprouvette contenant le cordon de soudure

IV.6 Essai de résilience

I.6.1 Principe de l'essai

L'essai de flexion par choc sur éprouvette entaillée a pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture brutale. Il est fréquemment appelé essai de résilience Charpy ou même essai Charpy. Cet essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette préalablement entaillée. On utilise un mouton-pendule muni à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc.

L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et la fin de l'essai. Les nouvelles machines sont munies d'un afficheur numérique permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que le pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette. L'énergie obtenue (en négligeant les frottements) est égale à :

$$W = m \times g \times h - m \times g \times h' \Rightarrow W = m \times g \times (h - h')$$

W : l'énergie absorbée (joule).

M : masse du mouton-pendule [kg].

g : Accélération terrestre [m s⁻²] (9.80665).

h : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m].

h' : hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée [m].

I.6.2 Préparation des éprouvettes

A partir du reste des deux plaques, nous avons découpé quatre parties de dimensions : 60 mm × 45 mm au niveau des zones suivantes :

- ✓ Métal de base ;
- ✓ Soudure au centre ;
- ✓ ZAT au centre ;
- ✓ ZAT+2 au centre.

Après découpage chacune de ces parties est découpée de nouveau en trois éprouvettes de dimensions : 55mm \times 10 mm \times 10mm (Figure IV. 16)



Figure IV.16 Epreuve pour l'essai de résilience en V.

IV.6.3 Exécution de l'essai de résilience

L'exécution de l'essai a été faite sur une machine de résilience Charpy (Figure IV.17). Notant qu'avant l'exécution de l'essai de résilience, il faut refroidir les éprouvettes jusqu'à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à l'aide d'un refroidisseur (Figure IV.18)



Figure IV.17 Machine de résilience.



Figure IV.18 Un refroidisseur.

Remarque : Un afficheur numérique est intégré à la machine de résilience pour afficher directement l'énergie absorbée et l'angle de remontée.

Nous avons réalisé quatre types d'éprouvettes :

- ✓ Entaille effectuée au centre du métal de base (épreuve complètement en métal de base) ;
- ✓ Entaille effectuée au centre du cordon de soudure ;
- ✓ Entaille effectuée au ZAT ;
- ✓ Entaille effectuée au ZAT+2.

IV.6.4 Présentation des résultats

Les résultats obtenus de l'énergie absorbée et de la résilience pour chaque type d'éprouvette sont présentés respectivement dans les tableaux IV .7 et 8. Notant que la résilience est obtenue en divisant l'énergie absorbée par la section S de l'éprouvette ($S=0.8 \text{ cm}^2$).

Test	L'ENEGIE ABSORBEE (J)			
	1	2	3	Moyenne
métal de base	210,2	203,3	213,2	208,9
ZAT	184,4	177,1	172,6	178,0
ZAT+2	208,2	191,8	193,3	197,7
Soudure	139,9	144,3	149,8	144,6

Tableau IV.7 Les valeurs de l'énergie absorbée pour les différentes zones.

Test	LA RESILIENCE (J/cm2)			
	1	2	3	Moyenne
métal de base	262,8	254,1	266,5	261,1
ZAT	230,5	221,4	215,7	222,5
ZAT+2	260,2	239,8	241,6	247,2
Soudure	174,9	180,4	187,3	180,8

Tableau IV. 8 Les valeurs de la résilience pour les différentes zones

IV.6.5 Discussions

Il est intéressant de remarquer que l'acier API 5L X70 est un acier ductile, ce qui justifie également son choix pour la fabrication des pipelines. En outre, on peut constater aussi que la ductilité diminue en s'approchant du cordon de soudure du fait que la ZAT est plus ductile que le cordon de soudure et moins ductile que le métal de base.

IV.7 Essai de traction en présence des trous circulaire

IV.7.1 But de l'étude

Dans cette partie nous allons présenter une étude détaillée de l'influence de la présence d'un trou circulaire dans des éprouvettes droite soumise à un chargement de traction sur l'évolution des propriétés mécaniques de l'acier API 5L X70. L'investigation a été étendue à l'effet de la taille du trou sur la limite de rupture.

IV.7.2 Principe de l'étude

Le principe de cette étude consiste à :

Varié la taille du trou des éprouvettes selon les diamètres : $\varnothing = (6\text{mm}, 9\text{mm}, 13\text{mm})$, afin de mettre en évidence des relations l'évolution des courbes contraintes-déformations au cours des essais de traction.

IV.7.3 Préparation des éprouvettes

A partir d'un tube, nous avons découpé une plaque suffisante pour la réalisation de toutes les éprouvettes des essais de traction.

Pour la réalisation des éprouvettes, nous avons utilisé premièrement une scie mécanique afin de découper la plaque en deux parties suffisantes pour la réalisation de deux éprouvettes par plaque. Après le découpage, les éprouvettes ont été usinées par le procédé de fraisage afin d'obtenir les dimensions normalisées des éprouvettes (voir figure IV.19).



Figure IV.19 Éprouvettes réalisées pour des essais de traction

Ensuite, dans un atelier d'usinage et après le traçage, nous avons procédé à percer une partie des éprouvettes par une machine à percer comme le montre les figures.

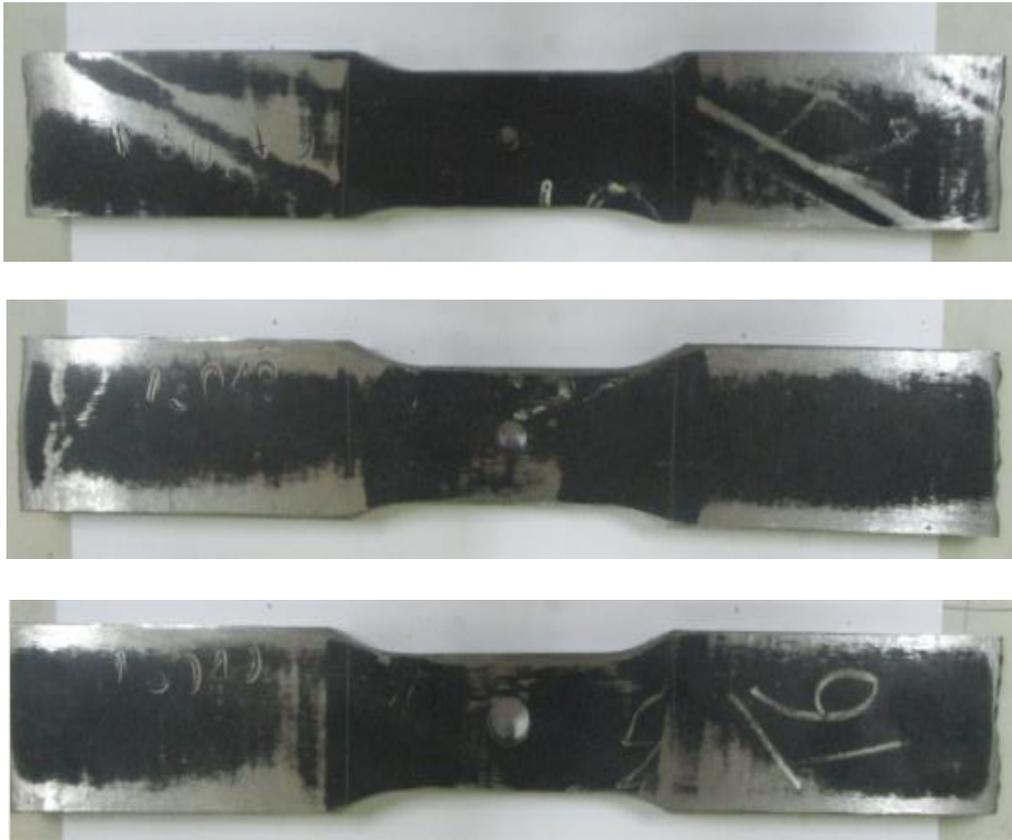


Figure IV.20 Éprouvettes réalisées pour des essais de traction selon différents taille du trou

IV.7.4 Présentation des résultats

Les courbes contraintes-déformations obtenues pour chaque taille du trou sont présentées sur les figures IV.21, 22, 23. Notant que deux tests ont été effectués pour chaque taille du trou. Une légère différence a été constatée entre les tests 1 et 2.

Les essais de traction ont été effectués à l'aide d'une machine de traction de type **PROF UND MESS SYSTEM N°8601** qui est reliée directement avec un système informatisée pour l'acquisition des données expérimentales.

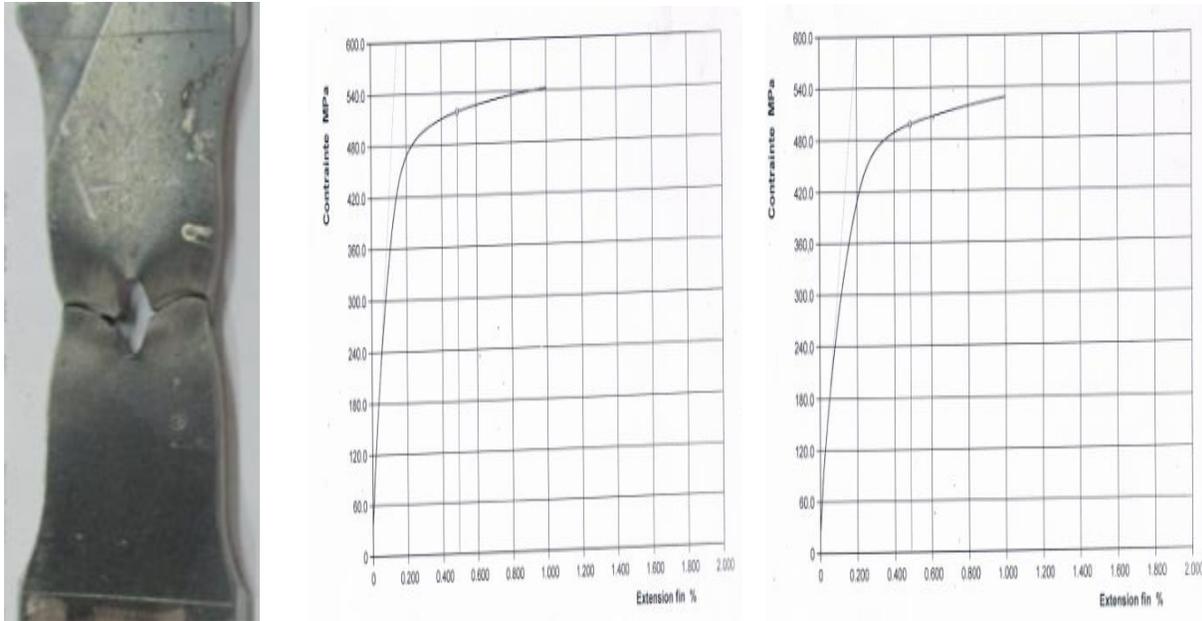


Figure IV.21 Résultats obtenus des essais de traction pour $\varnothing = 6$ mm

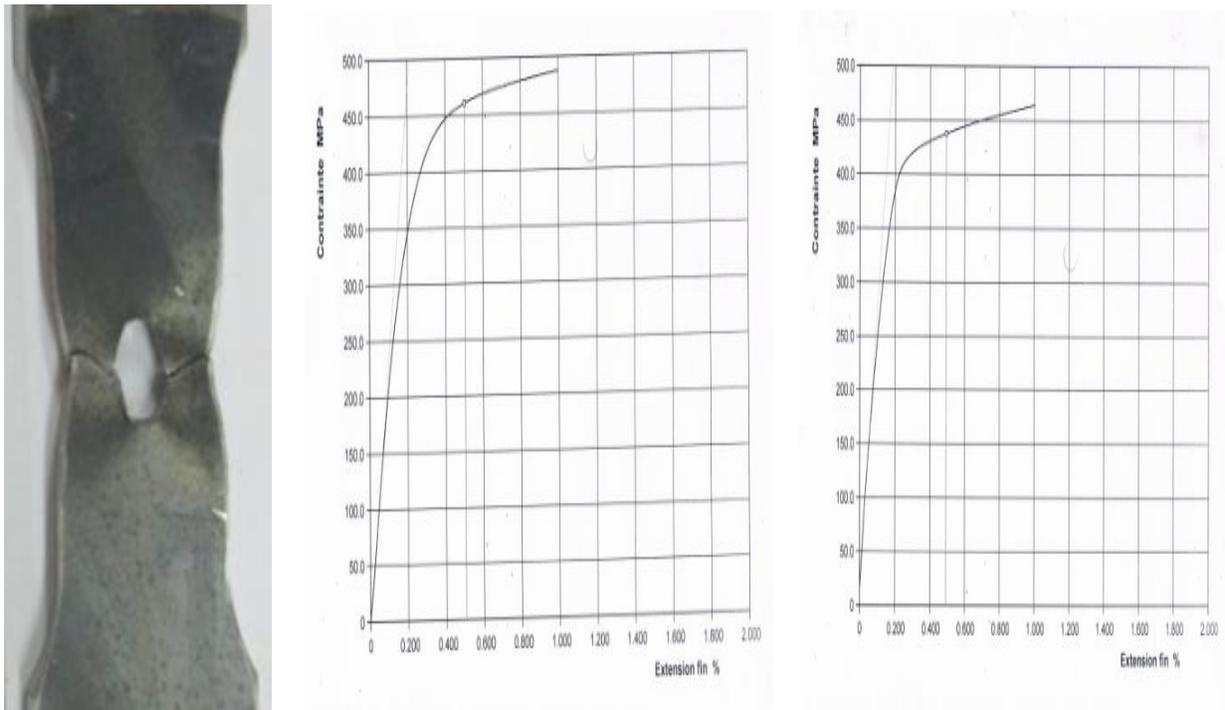


Figure IV.22 Résultats obtenus des essais de traction pour $\varnothing = 9$ mm

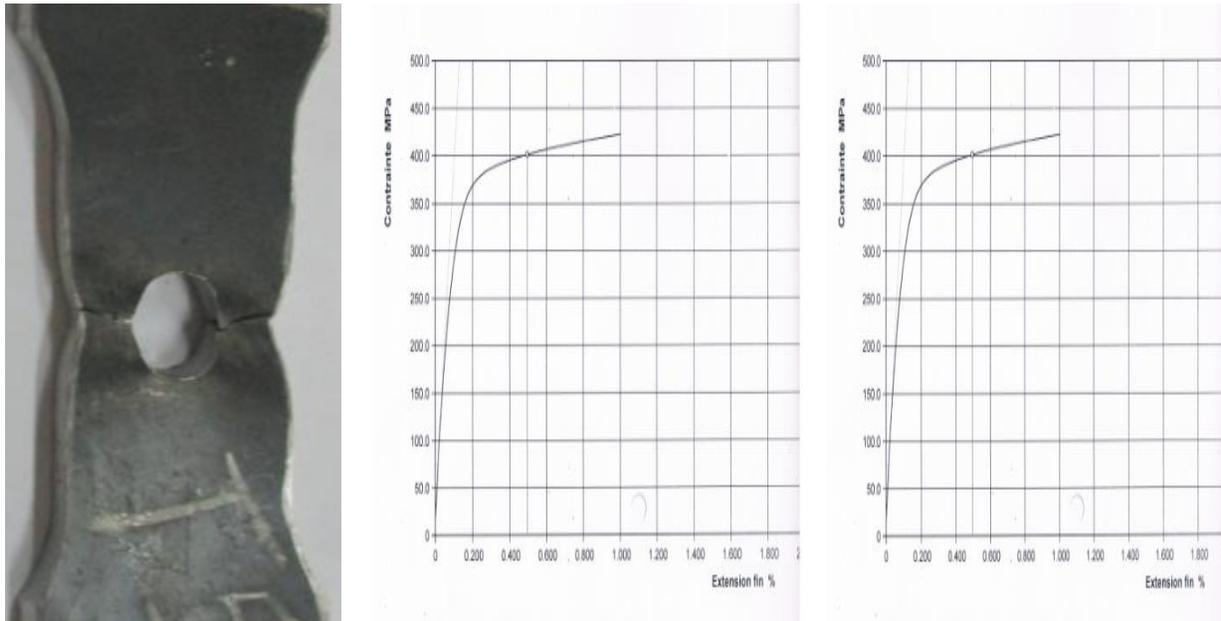


Figure IV.23 Résultats obtenus des essais de traction pour $\varnothing = 13$ mm

Les résultats obtenus pour les limites élastiques et à la rupture ainsi que l'allongement en % sont présentés dans le tableau IV.9.

	N° test	largeur (mm)	épaisseur (mm)	La limite élastique Re (Mpa)	La limite à la rupture Rm (Mpa)	A%
Sans perçage	1	38,3	13,06	559	671	37,9
	2	38,4	13,11	558	672	37,2
$\varnothing=6$ mm	1	38.4	13.12	524	582	19.8
	2	38.3	13.05	518	579	19.9
$\varnothing=10$ mm	1	38.4	13.06	459	524	18.8
	2	38.2	13.08	456	518	19.0
$\varnothing=13$ mm	1	38.1	13.07	391	455	18.5
	2	38.2	13.12	390	453	18.4

Tableau IV.9 Résultats obtenus des essais de traction pour différentes tailles du trou

Afin qu'on puisse faire une comparaison entre les résultats obtenus pour différentes tailles du trou, les différents paramètres (R_e , R_m et $A\%$) ont été représentés graphiquement comme illustré sur les figures IV.24, 25 et 26 respectivement.

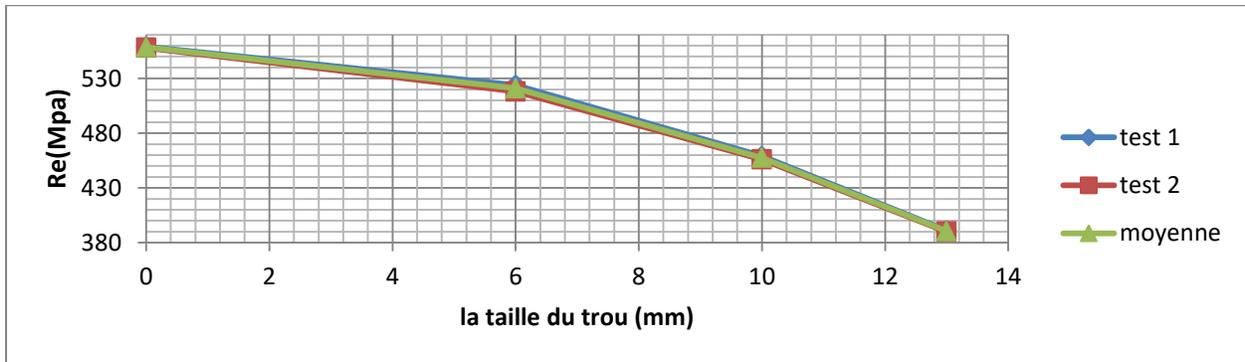


Figure IV.24 La variation de la limite élastique (R_e) en fonction de la taille du trou



Figure IV.25 La variation de la limite à la rupture (R_m) en fonction de la taille du trou.

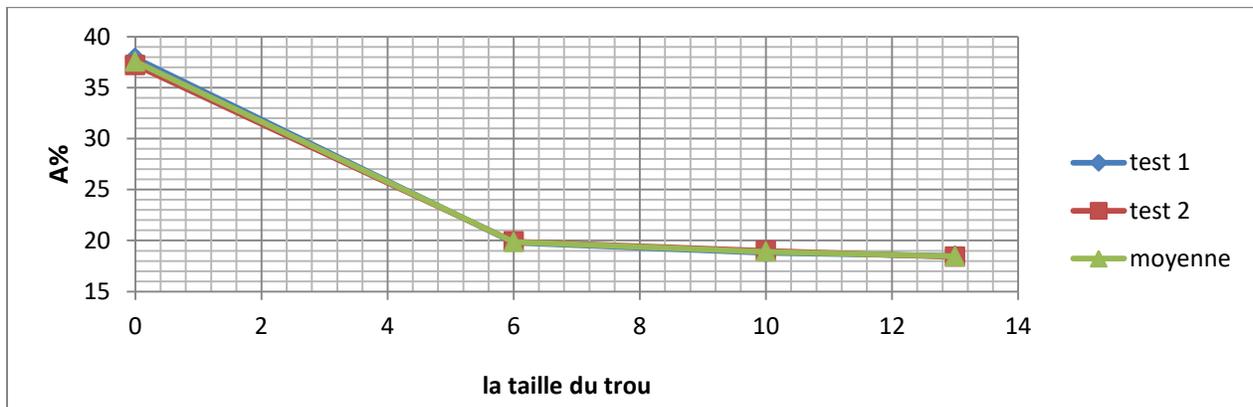


Figure IV.26 La variation de l'allongement ($A\%$) en fonction de la taille du trou

IV.8 Essai de traction en présence des défauts latéraux de type fissure

IV.8.1 But de l'étude

Pour la deuxième partie, nous allons présenter une étude effet de différents longueurs de défaut latéral de type fissure sur le comportement mécanique des éprouvettes en acier API 5L X70 soumises à un chargement axial.

IV.8.2 Principe de l'étude

Le principe de cette étude consiste à :

Varié la taille du défaut en faisant changer la dimension caractéristique de celui-ci. Pour la fissure, c'est sa longueur : $L = (4 \text{ mm}, 6 \text{ mm}, 10 \text{ mm})$, afin de mettre en évidence des relations l'évolution des courbes contraintes-déformations au cours des essais de traction.

IV.8.3 Préparation des éprouvettes

A partir d'un tube, nous avons découpé une plaque suffisante pour la réalisation de toutes les éprouvettes des essais de traction.



Figure IV.27 Éprouvettes réalisées pour des essais de traction selon différents longueurs pour la fissure

Pour la réalisation des éprouvettes, nous avons utilisé premièrement une scie mécanique afin de découper la plaque en deux parties suffisantes pour la réalisation de deux éprouvettes par plaque. Après le découpage, les éprouvettes ont été usinées par le procédé de fraisage afin d'obtenir les dimensions normalisées des éprouvettes

Ensuite, dans un atelier d'usinage et après le traçage, nous avons utilisé une scie mécanique afin de tailler une partie des éprouvettes pour différentes longueurs comme le montre les figures IV.27

IV.8.4 Présentation des résultats

Les courbes contraintes-déformations obtenues pour chaque longueur de la fissure sont présentées sur les figures IV.28 à 30. Notant que deux tests ont été effectués pour chaque longueur de fissure. Une légère différence a été constatée entre les tests 1 et 2.

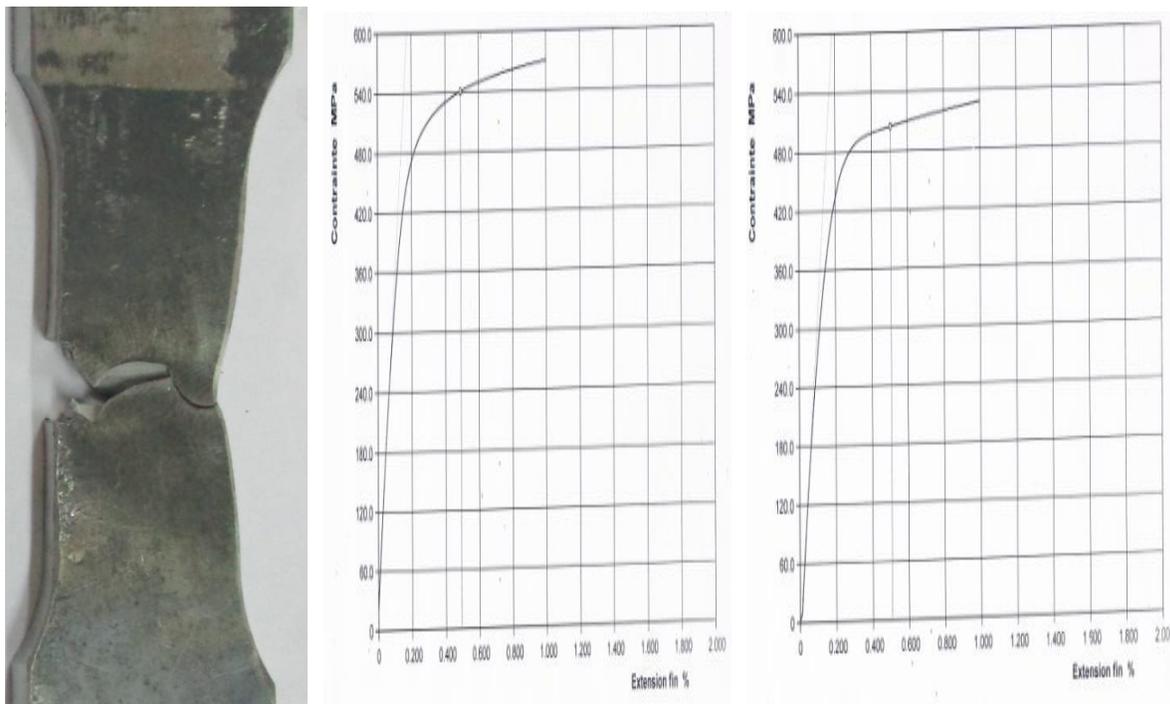


Figure IV.28 Résultats obtenus des essais de traction pour $L = 4$ mm

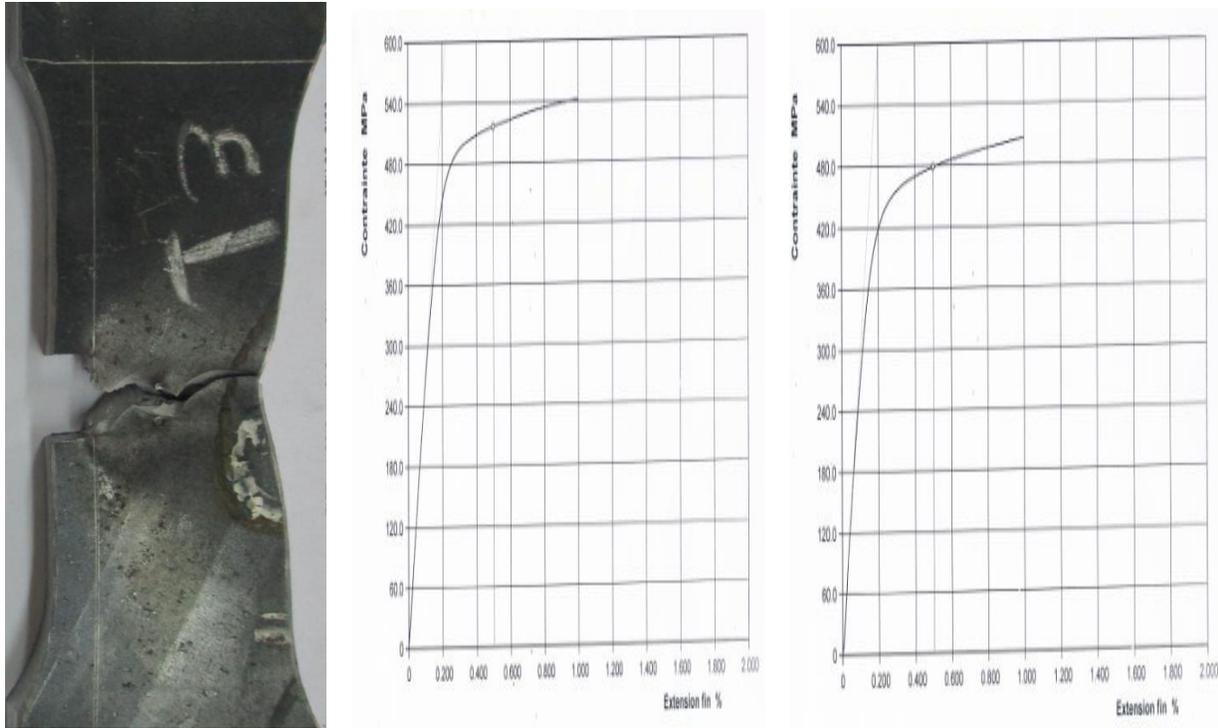


Figure IV.29 Résultats obtenus des essais de traction pour $L = 7$ mm

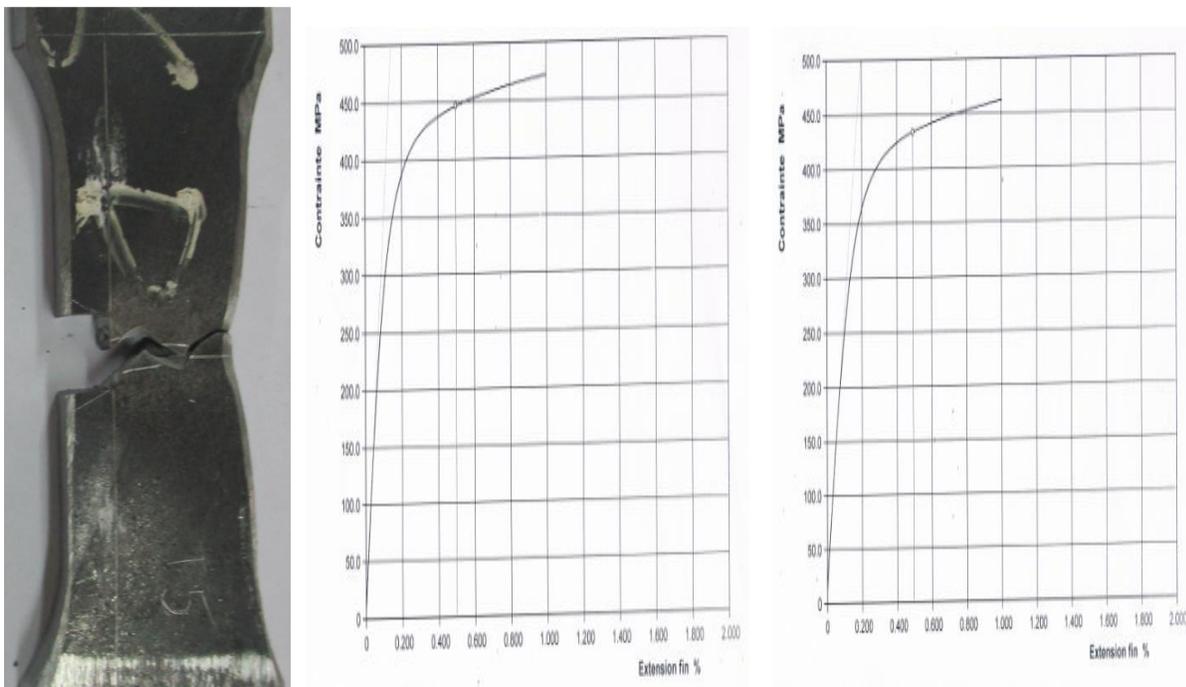


Figure IV.30 Résultats obtenus des essais de traction pour $L = 10$ mm

Les résultats obtenus pour les limites élastiques et à la rupture ainsi que l'allongement en % sont présentés dans le tableau IV.10.

	N° test	largeur (mm)	épaisseur (mm)	La limite élastique Re (Mpa)	La limite à la rupture Rm (Mpa)	A%
Sans perçage	1	38,3	13,06	559	671	37,9
	2	38,4	13,11	558	672	37,2
L=4 mm	1	38,3	13,10	542	616	26,9
	2	38,2	13,06	538	612	25,8
L=7 mm	1	38,3	13,07	508	577	23,2
	2	38,2	13,04	503	572	23,8
L=10 mm	1	38,4	13,07	447	508	21,8
	2	38,2	13,12	445	506	21,3

Tableau IV.10 Résultats obtenus des essais de traction pour différentes tailles du trou

Afin qu'on puisse faire une comparaison entre les résultats obtenus pour différentes longueurs de fissure, les différents paramètres (Re, Rm et A%) ont été représentés graphiquement comme illustré sur les figures IV.31, 32, 33 respectivement.

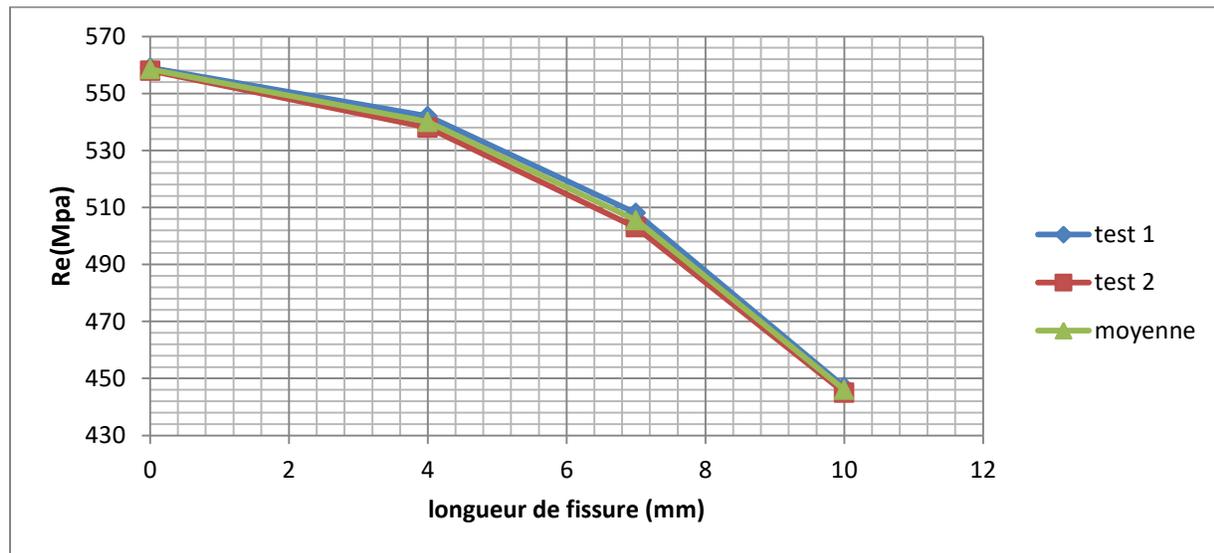


Figure IV.31 La variation de la limite élastique (R_e) en fonction de la longueur de fissure

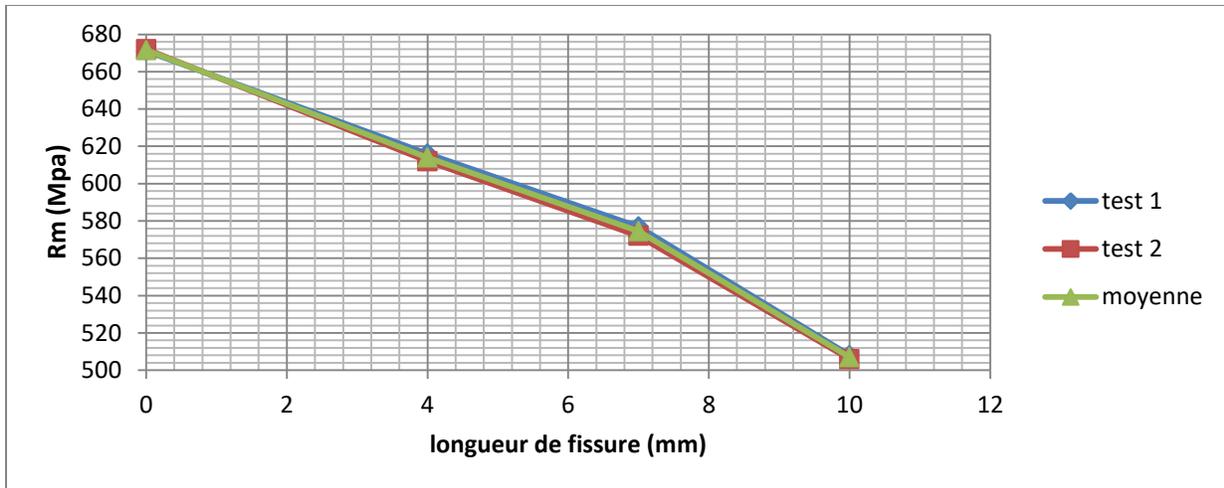


Figure IV.32 La variation de la limite à la rupture (R_m) en fonction de la longueur de fissure

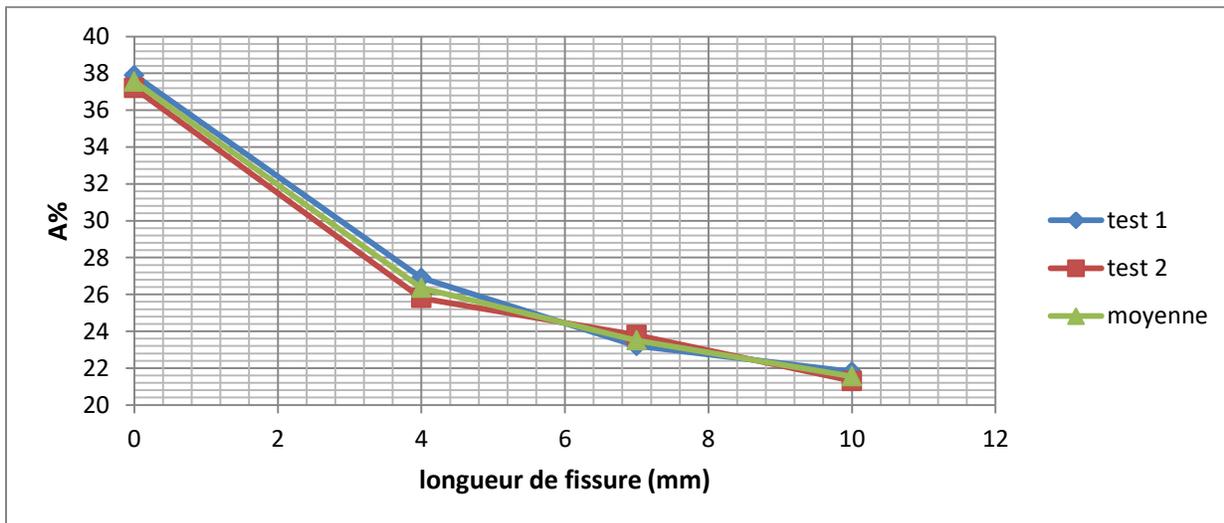


Figure IV.33 La variation de la déformation ($A\%$) en fonction de la longueur de fissure

IV.8.5 Comparaison entre les résultats obtenus pour les deux cas d'étude

Afin qu'on puisse faire une comparaison entre les résultats obtenus pour différentes tailles du trou et longueur de la fissure, les différents paramètres (R_e , R_m et $A\%$) ont été représentés graphiquement comme illustré sur les figures IV.34, 35, 36 respectivement.

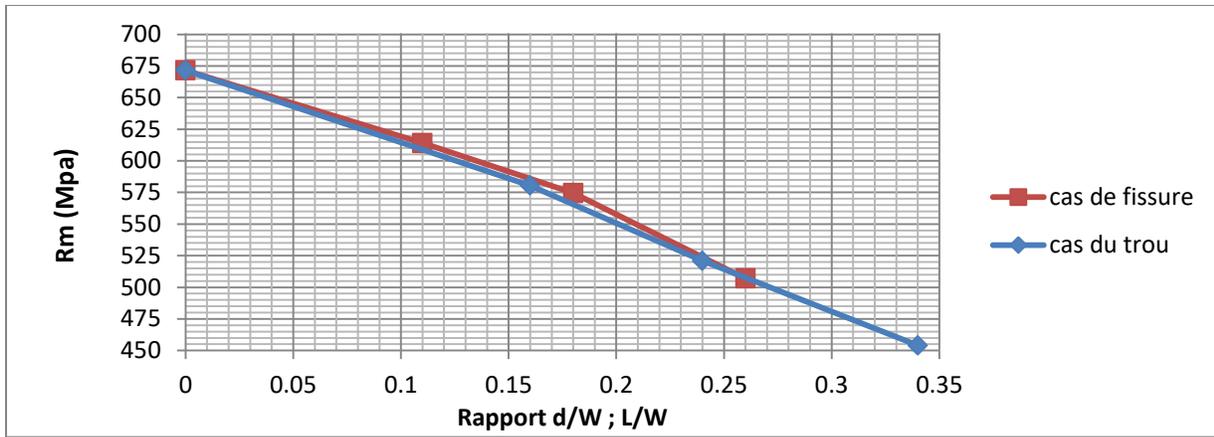


Figure IV.34 La variation de la limite élastique (R_m) en fonction de rapport d/w , L/w

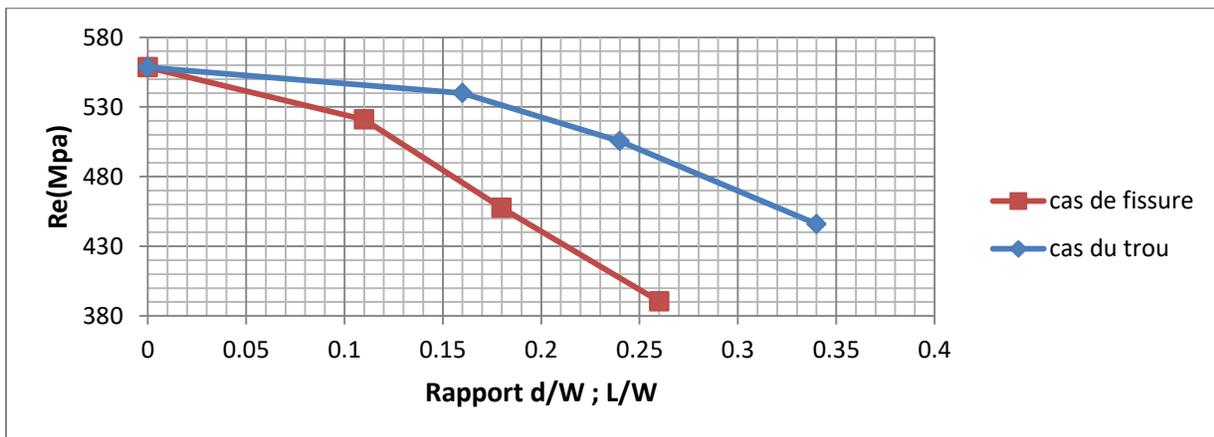


Figure IV.35 La variation de la limite à la rupture (R_e) en fonction de rapport d/w , L/w

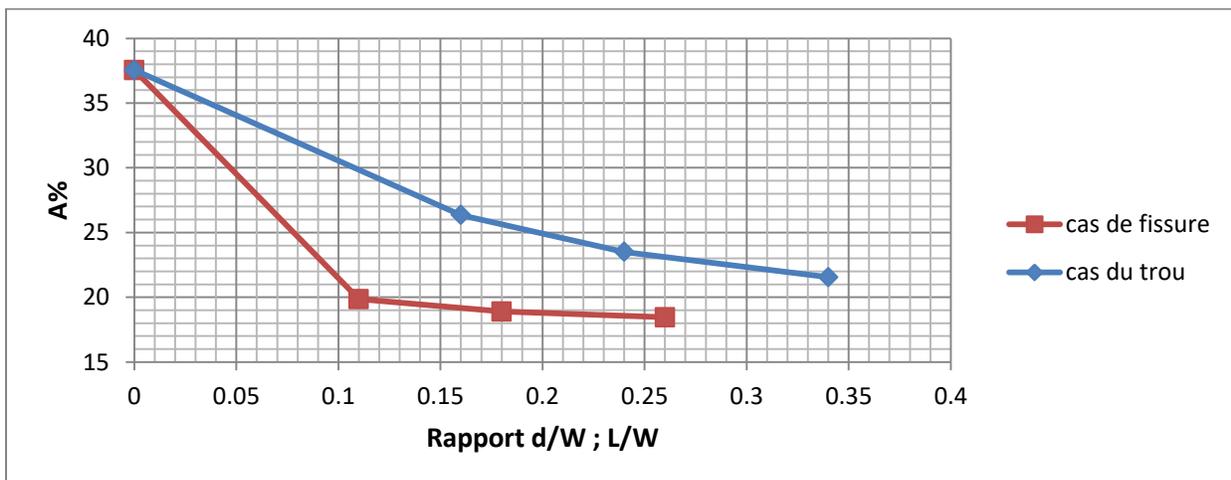


Figure IV.36 La variation de l'allongement ($A\%$) en fonction du rapport d/w , L/w

IV.8.6 Discussions

Une variation importante de R_e , R_m et $A\%$ a été remarquée en fonction de la taille du trou et la longueur de la fissure.

La contrainte est sensible à la taille du trou et la longueur de fissure. Il a été observé que R_e , R_m , $A\%$ diminuent rapidement proportionnellement au diamètre du trou et la taille de fissure.

Les limites d'élasticités R_e et l'allongement $A\%$ obtenus par les éprouvettes contenant des trous sont supérieurs à ceux obtenus en utilisant des éprouvettes contenant des fissures. Cette différence est due principalement lorsque le trou devient aigu, la concentration des contraintes augmente rapidement et devient de plus en plus faible. Ainsi, les trous sphériques sont moins dangereux par rapport à ceux aigus,

Les trous de tailles importantes conduisent à de forts facteurs d'intensité de contraintes. Ce comportement montre clairement que la présence des trous dans une plaque est un siège de concentration de contraintes pouvant conduire à l'amorçage et la propagation de fissures.

Chapitre V

**Simulation par la méthode des
éléments finis**

V.1 Introduction

Pour mener notre étude par simulation numérique, on a utilisé le code numérique «ABAQUS», qui est l'un des codes de calcul les plus utilisés dans le monde. Il est basé sur la méthode des éléments finis.

Dans notre analyse, on a utilisé ABAQUS version 6.16, qui permet de traiter la majorité des problèmes de mécanique de la rupture et fissuration des structures. Il offre des outils puissants pour l'analyse en deux et trois dimensions.

Le chapitre V présente une étude par simulation numérique, Il se compose de deux parties essentielles, la première concerne l'analyse tridimensionnelle de concentration de contraintes dans une plaque trouée en traction et la deuxième concerne une étude sur l'effet de différents types de défauts sur le comportement mécanique d'une plaque fissurée en traction.

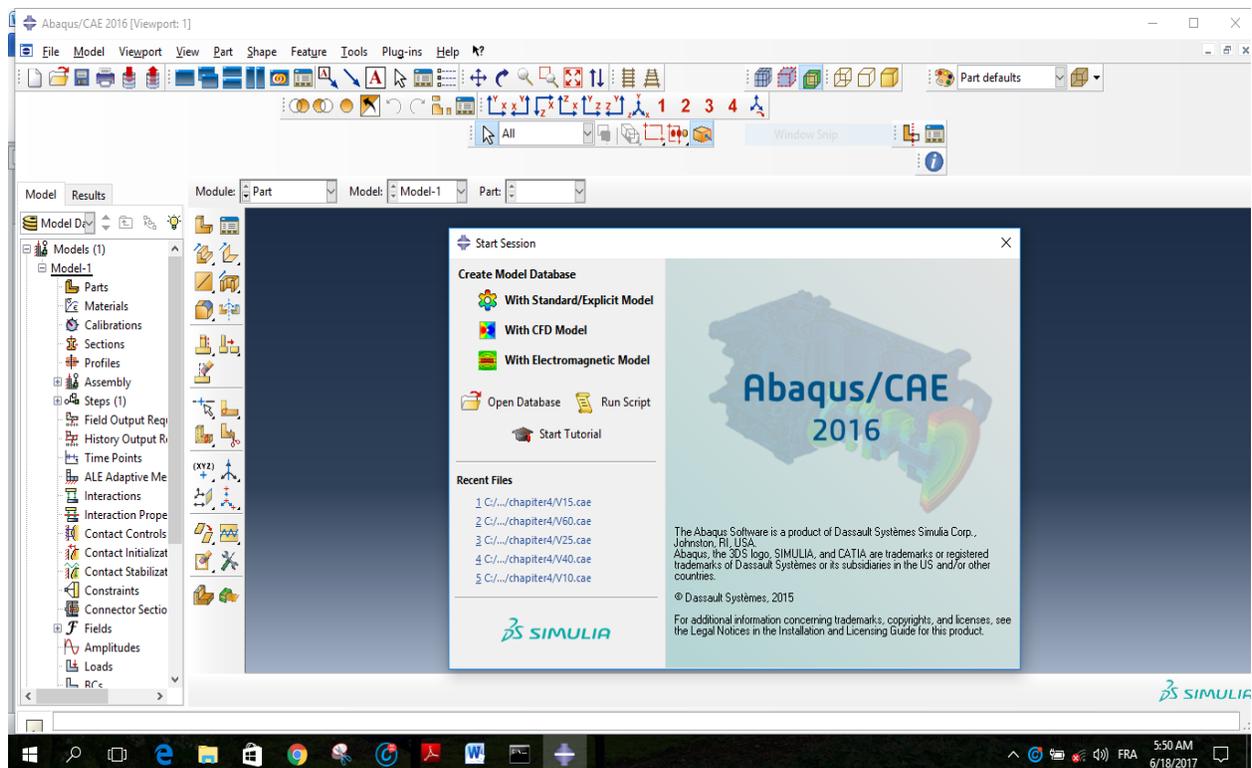


Figure V.1 Interface ABAQUS 6.16

V.2 Partie 1 : Analyse tridimensionnelle de concentration de contraintes dans une plaque trouée en traction

V.2.1 Introduction

La concentration de contraintes est un problème souvent rencontré dans la conception mécanique d'un composant ou organe mécanique. C'est un phénomène d'augmentation locale des contraintes dans une zone comportant une modification géométrique de la pièce. Le phénomène de concentration de contraintes a été traité par plusieurs auteurs [31,32] pour un problème de concentration de contraintes autour d'un trou.

Ensuite, des solutions analytiques ont été progressivement trouvées par différents chercheurs pour des géométries de pièces de plus en plus complexes. H. Neuber [33] et R.E. Peterson [34] ont beaucoup contribué à la connaissance dans ce domaine en faisant une analyse systématique pour les principales géométries et sollicitations mécaniques rencontrées dans la conception.

Parfois, pour différentes raisons pratiques dans le cas de conception ou le cas d'entretien, plusieurs trous doivent être percés dans la structure ce qui a pour effet de l'affaiblir. Donc il est nécessaire de prévoir le comportement de ces matériaux et étudier l'effet des forces et des contraintes sur les trous. Dans ce contexte, notre étude dans ce chapitre c'est concentrée sur la détermination numérique par la méthode des éléments finis du facteur de concentration de contrainte K_t dû à la présence d'un trou circulaire dans une plaque droite soumise à un chargement de traction. En plus l'investigation a été étendue à l'effet de la contrainte appliquée, la taille et la forme du trou sur le facteur de concentration de contrainte.

V.2.2 Modèle utilisé et matériau analysé

On s'intéresse à l'étude des contraintes dans une plaque trouée soumise à un effort de traction uniaxiale (voir Figure V.2). On considère que le trou est suffisamment petit pour que l'état de contrainte loin du trou ne soit pas affecté par sa présence.

Un modèle géométrique tridimensionnel a été développé pour analyser la distribution et l'intensité des contraintes induites dans une plaque trouée près du trou (voir Figure V.2.a). Le trou de forme cylindrique est situé dans la plaque simulée par un modèle en 3D dont la taille est: la longueur, la largeur et l'épaisseur du modèle sont 200mm, 100mm et 20mm, respectivement. Le diamètre du trou est de 18mm. La structure est soumise à un chargement mécanique uniaxial P ($P=100\text{MPa}$) suivant l'axe Y .

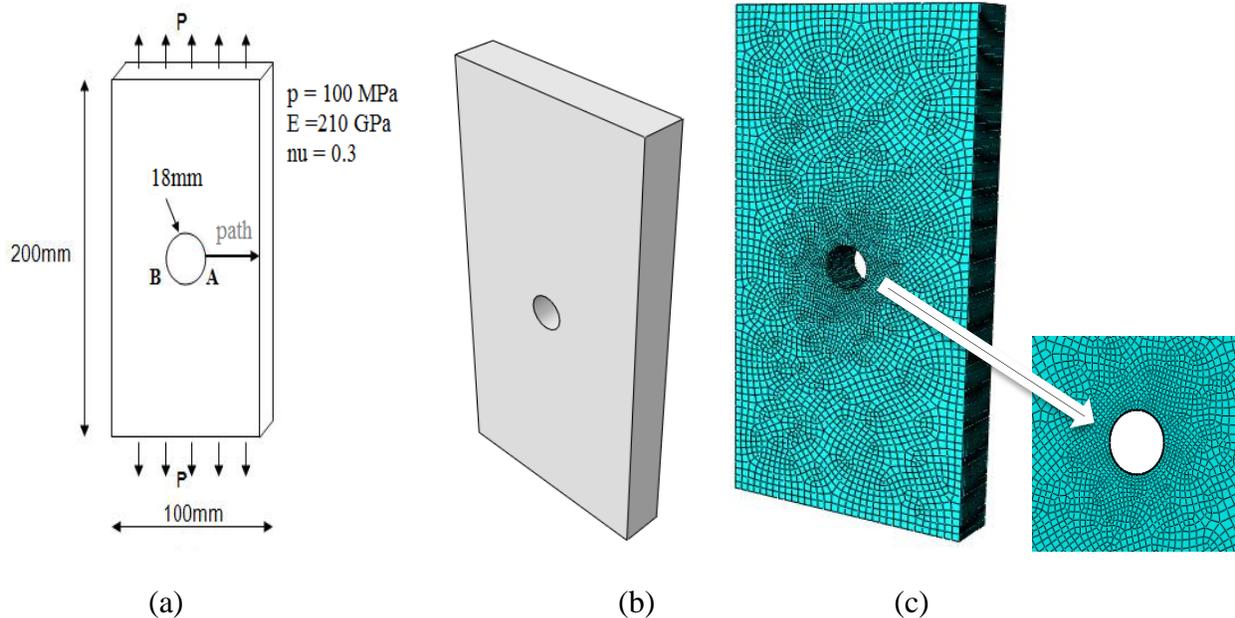


Figure V. 2 Représentation schématique du modèle.

La simulation numérique est faite par le code de calcul par éléments finis ABAQUS [35]. La précision du calcul numérique est fortement liée à la qualité du maillage autour du trou. Un maillage optimum constitué d'éléments C3D8R (élément à huit nœuds de type iso paramétrique) avec un nombre total d'éléments égal à 88820 a été choisi pour la structure, le maillage a été raffiné dans les régions jugées critiques où l'on prévoit de fortes concentration de contraintes, notamment à l'interface (voir figure V.2.b). Un acier est sélectionné dans cette étude, il a été défini comme un matériau élastique dont les propriétés mécaniques sont données par, $E = 210$ GPa, $\nu = 0,3$.

V.2.3 Résultats et analyse

V.2.3.1 Distribution des contraintes

Les résultats obtenus à partir de cette analyse sont illustrés sur la (figureV.3). Cette dernière présente la répartition de la contrainte équivalente de Von Mises et des contraintes normales dans la plaque près du trou. Cette figure montre que les contraintes plus élevées se sont localisées près de l'interface avec le trou (aux points A et B). Loin de cette dernière, la plaque est totalement relaxée de ces contraintes.

V.2.3.2 Effet du chargement mécanique

L'effet du chargement mécanique sur l'amplitude et la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises et des contraintes normales induites dans la plaque le long de la direction définie par « path 1 » (voir figureV.2.a) est représenté sur la figure V.4.

L'influence des sollicitations mécaniques sur l'intensité de la contrainte équivalente est représentée sur la figure(V.4.a).

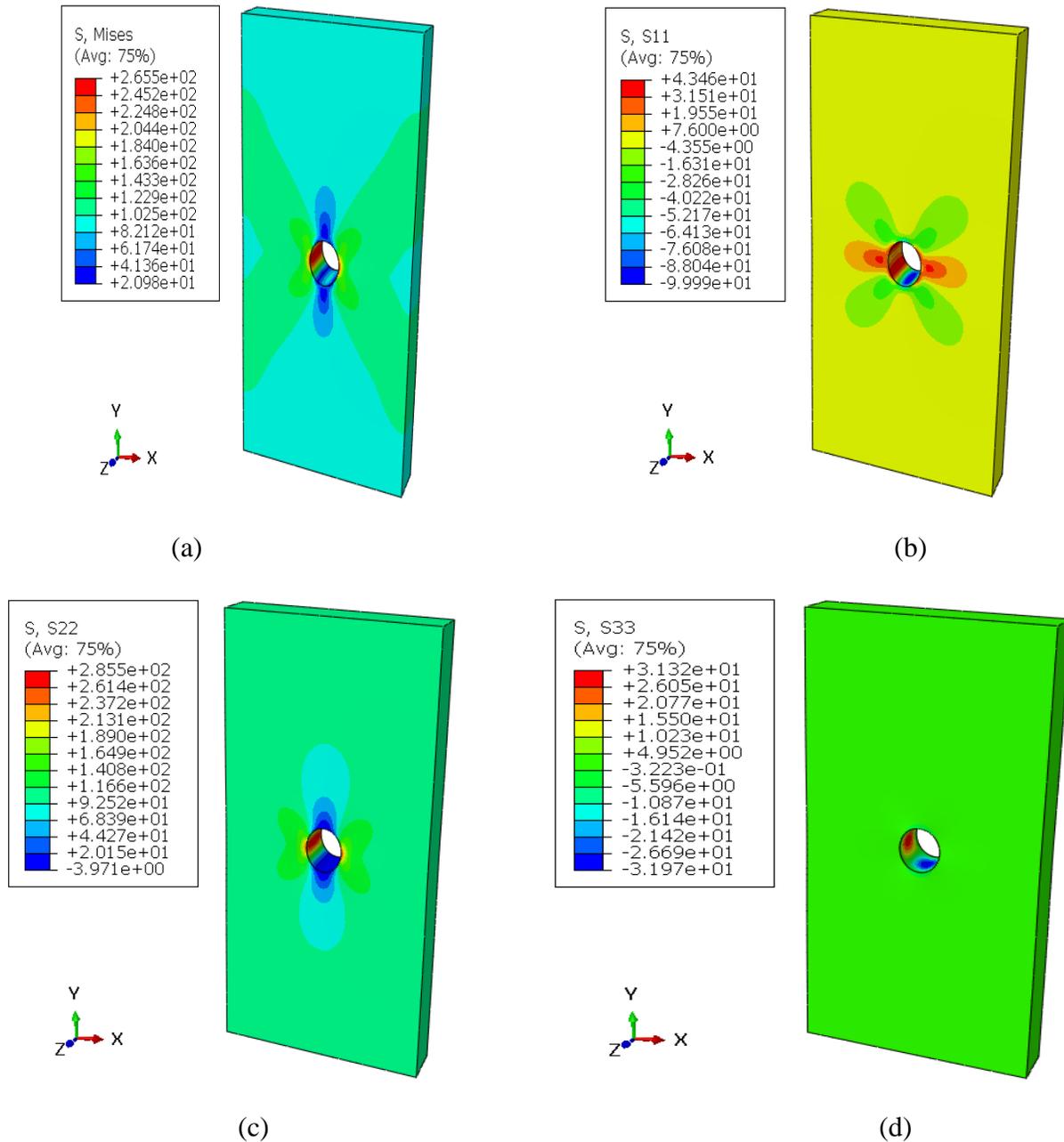


Figure V. 3 Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique $P= 100$ MPa

V.2.3.3 Discussions

L'influence des sollicitations mécaniques sur l'intensité de la contrainte équivalente est représentée sur la figure(V.4.a), elle montre clairement qu'un effort plus intense induit une contrainte plus forte, la plaque dont le niveau atteint son maximum près de l'interface avec le trou.

L'analyse de la figureV.6.b montre que la contrainte normale S_{XX} met la plaque en tension dont l'amplitude croit fortement près de l'interface avec le trou. Cette amplitude est d'autant plus importante que la charge mécanique est plus forte.

La répartition de la contrainte normale S_{YY} est complètement différente de celle de la composante S_{XX} (voir FigureV.6.b). Son intensité maximale est atteinte près de l'interface avec le trou (voir Figure.6.c). Les contraintes induites dans la plaque à l'interface du trou sont plus importantes que celle résultant de la première direction-x.

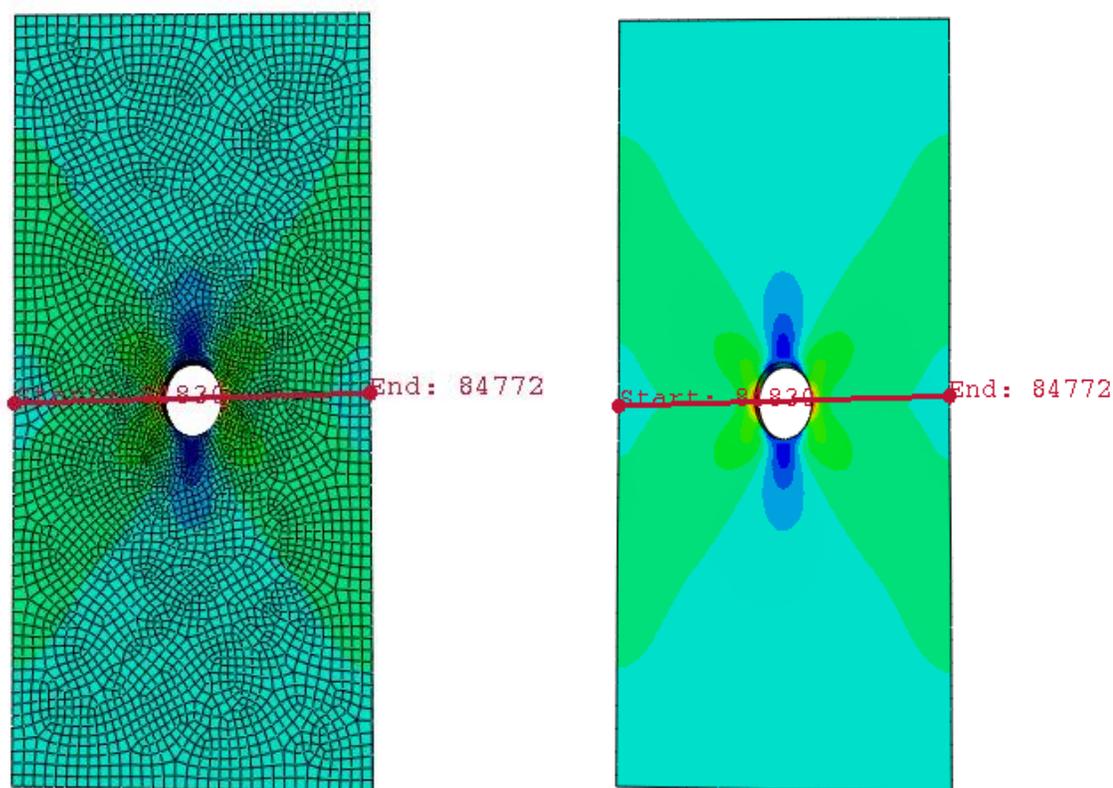
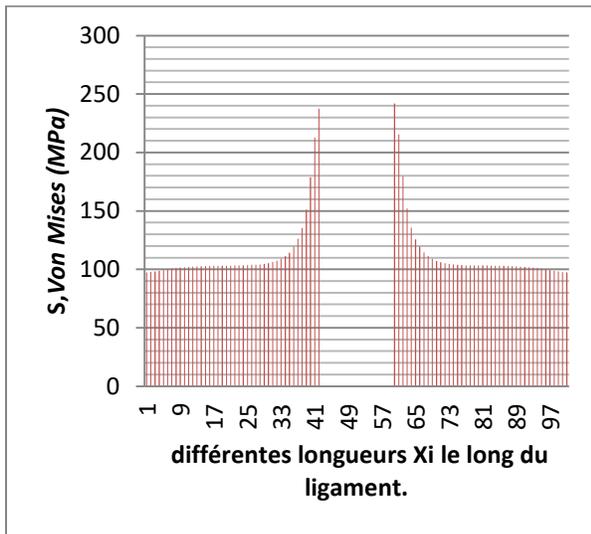
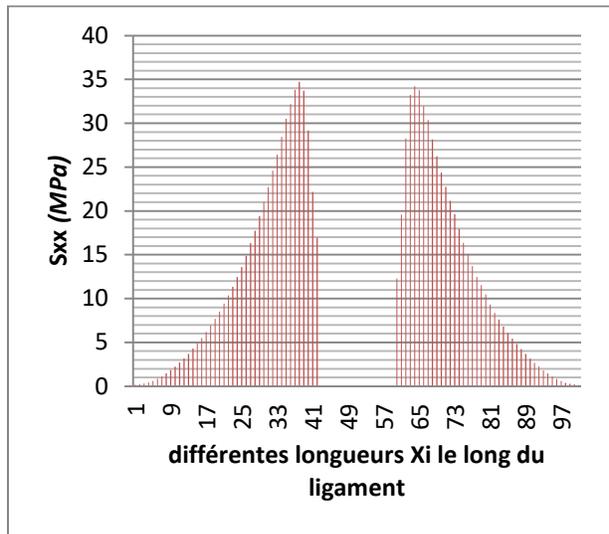


Figure V. 4 Représentation schématique du modèle avec path

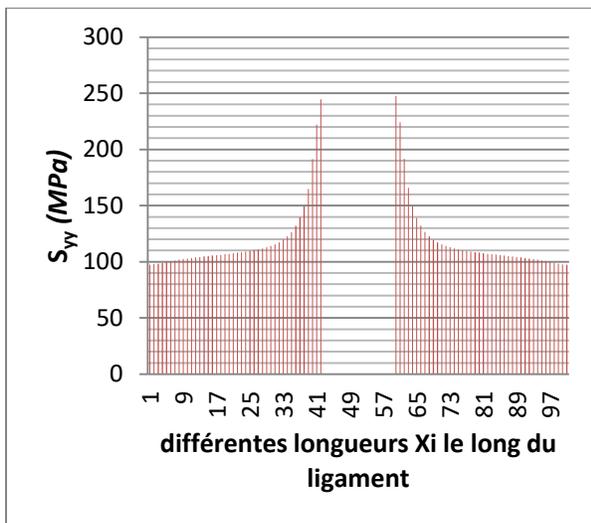
V.2.3.4 Resultats



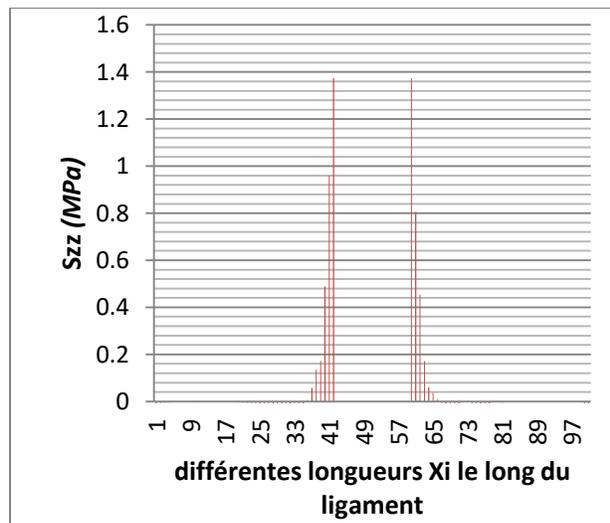
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure V .5 Variation des contraintes équivalente de Von Mises et normales pour différentes longueurs X_i le long du ligament

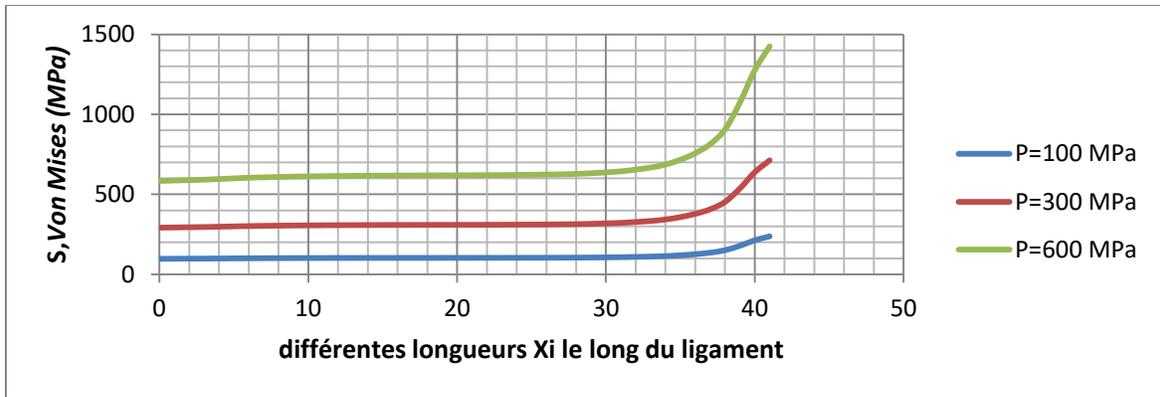


Figure V.6.a Variation des contraintes équivalentes de Von Mises en fonction de la charge appliquée.

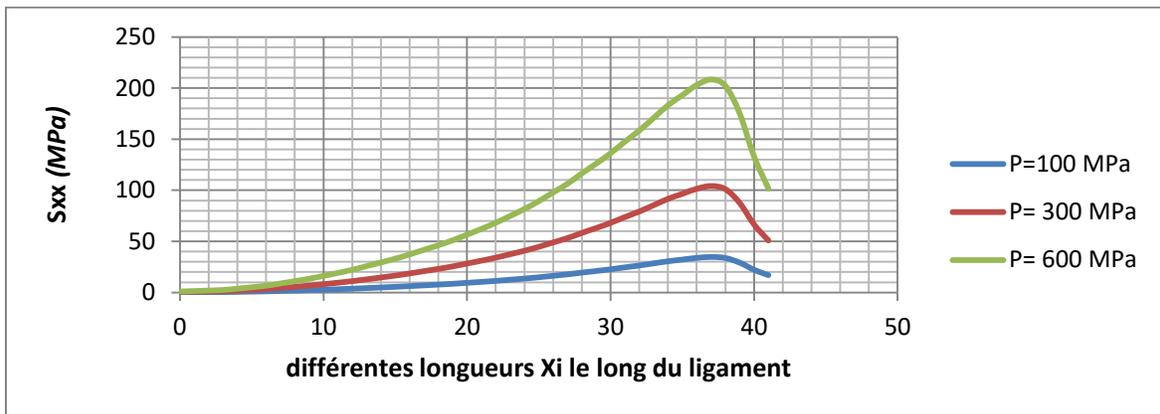


Figure V.6.b Variation des contraintes normales en fonction de la charge appliquée

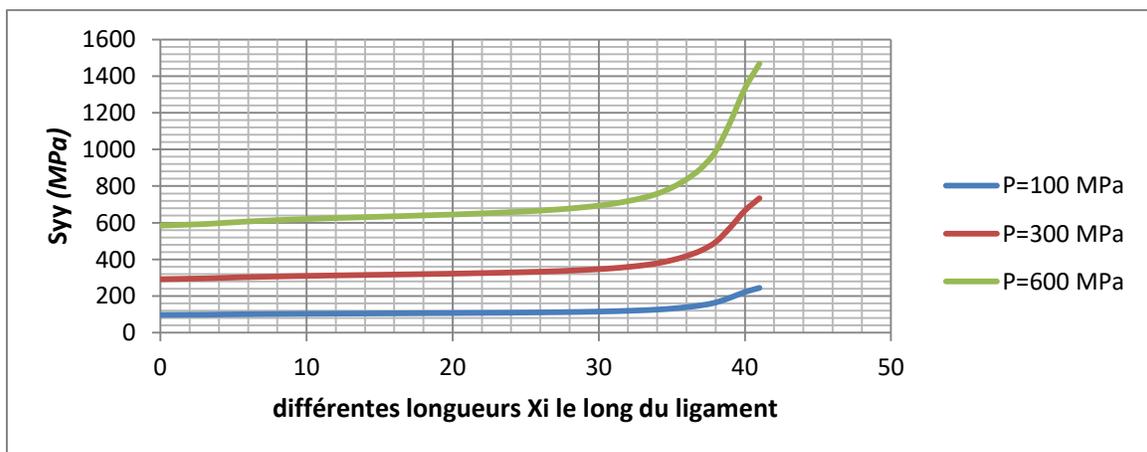


Figure V.6.c Variation des contraintes normales en fonction de la charge appliquée

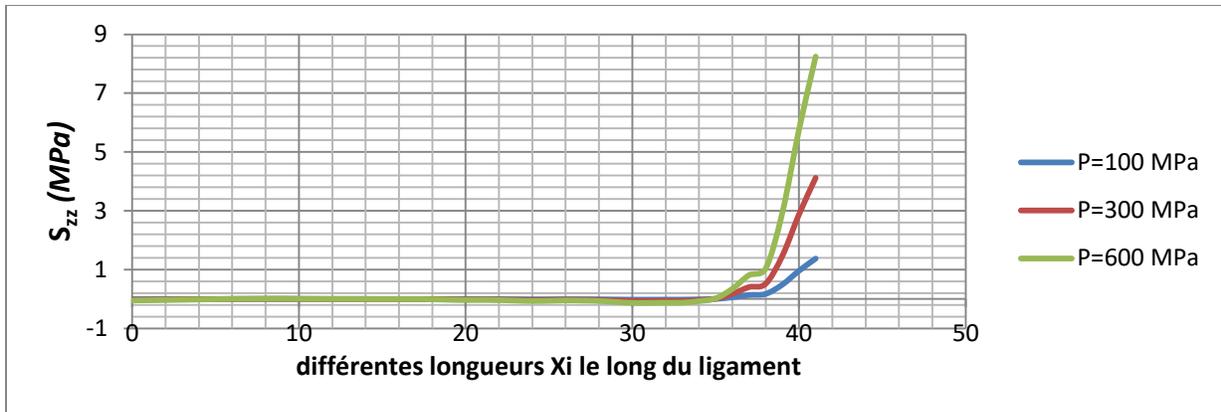


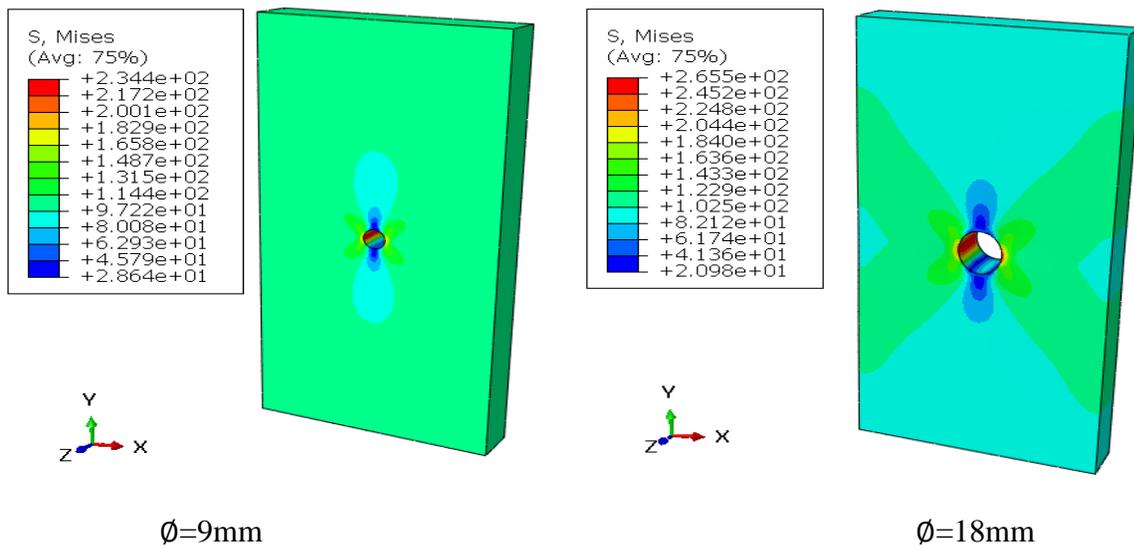
Figure V.6.d Variation des contraintes normales en fonction de la charge appliquée

V.2.3.5 Discussions

Les contraintes normales dans la direction-z mettent la plaque en compression (voir FigureV.6.d). La répartition de ces contraintes dans la plaque est différente de celle des composantes de contrainte S_{XX} et S_{YY} . En effet, elles sont intensivement localisées dans la plaque à proximité de l'interface plaque-trou. Leurs amplitudes diminuent brusquement dans la plaque et tend vers des valeurs nulles.

V.2.4 Effet de la taille du trou

La distribution des contraintes équivalentes induites localement dans la plaque autour du trou en fonction de la taille du trou, est illustrée sur la figure V.7. L'analyse de cette figure montre que les trous de taille élevée engendrent des contraintes plus importantes.



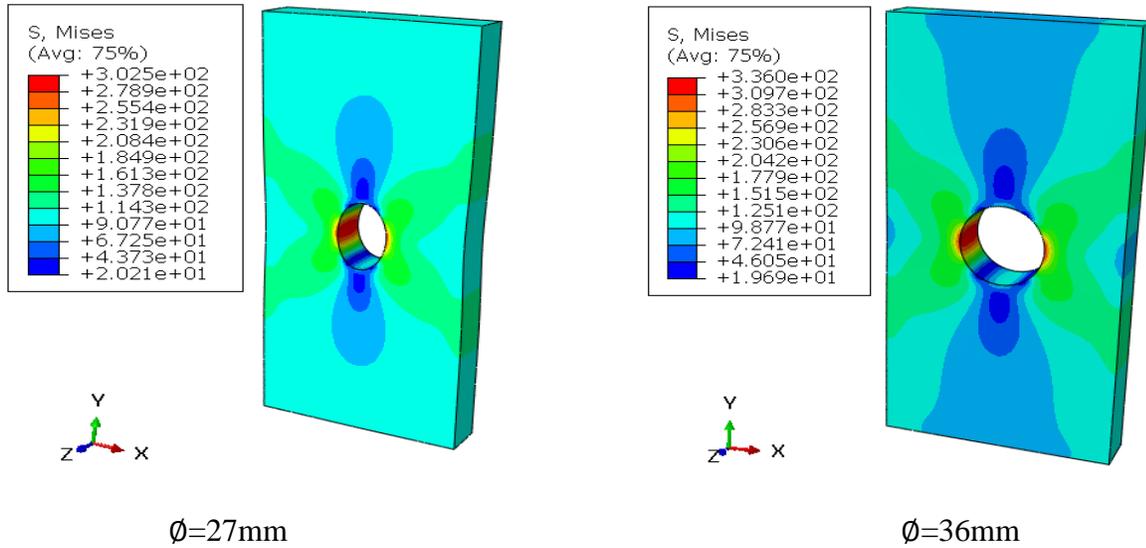


Figure V. 7 Effet de la taille du trou sur le niveau et la distribution des contraintes équivalente S_{VM} induites localement dans la plaque autour du trou.

V.2.4.1 Résultats

L'influence de la taille du trou (diamètre) sur la variation du facteur de concentration de contrainte a été étudiée. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures V.8 et 9.

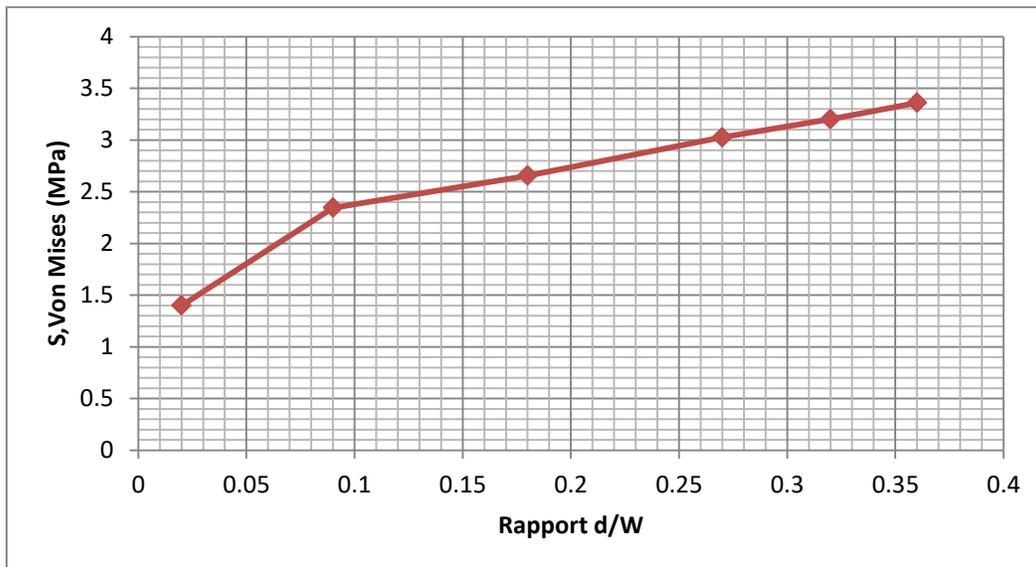


Figure V.8 Variation des contraintes équivalente de Von Mises en fonction des rapports (d/W).



Figure V. 9 Variation du facteur de concentration de contrainte en fonction de la taille du trou

V.2.4.2 Discussions

Le facteur de concentration de contrainte augmente lentement puis rapidement avec l'augmentation de la taille du trou. Les trous de tailles importantes conduisent à de forts facteurs d'intensité de contraintes. Ce comportement montre clairement que la présence des trous dans une plaque est **un siège de concentration de contraintes pouvant conduire à l'amorçage et la propagation de fissures.**

V.2.5 Effet de la forme du trou

Les études précédentes ont été faites avec l'hypothèse que le trou présente une forme cylindrique. Dans cette partie du travail, l'effet de la forme géométrique, caractérisée par le rapport de la taille selon la direction x par rapport à celle selon l'axe y (dx/dy), des trous présents dans une plaque droite sur le facteur de concentration de contrainte ont été analysés. Les résultats de cette analyse sont représentés sur les figures V.10 et 11.

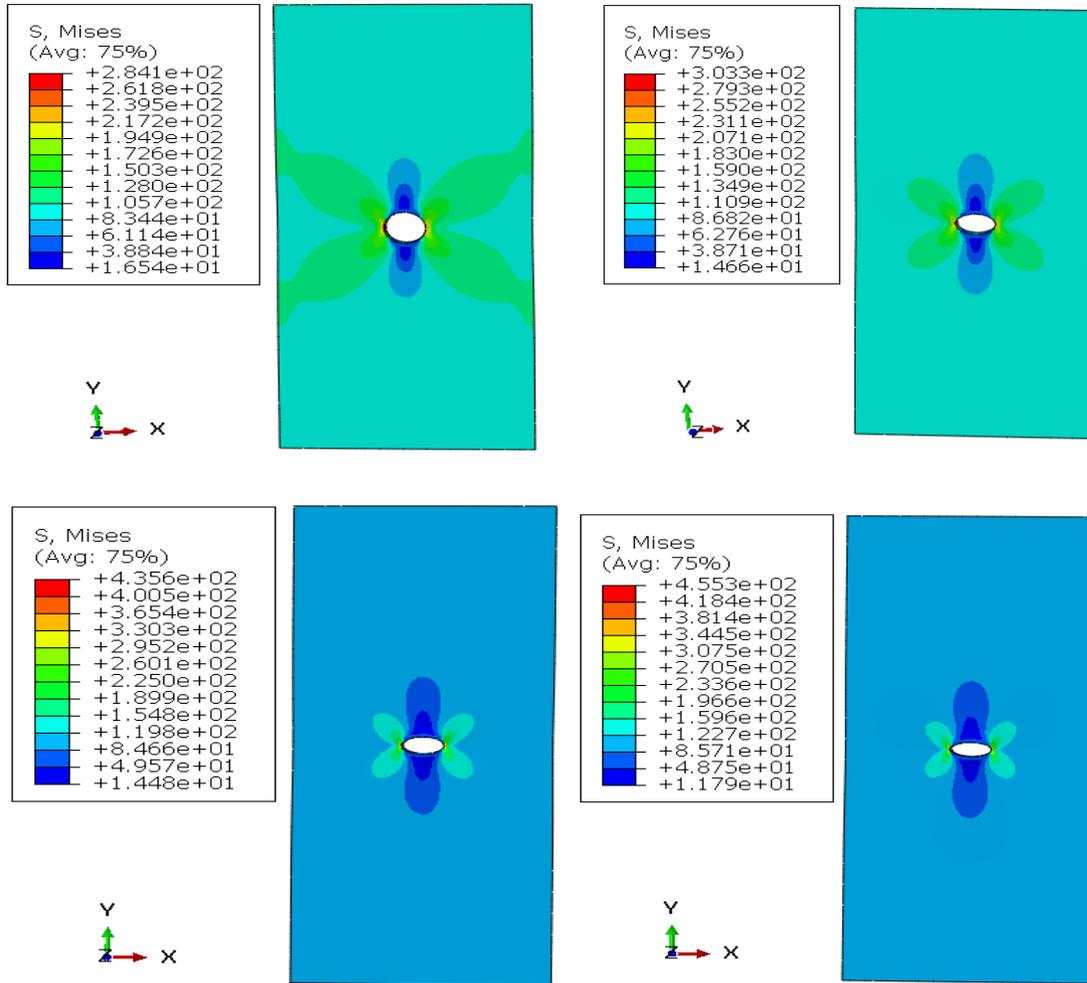


Figure V. 10 Effet de la forme du trou sur le niveau et la distribution des contraintes équivalentes S_{VM}

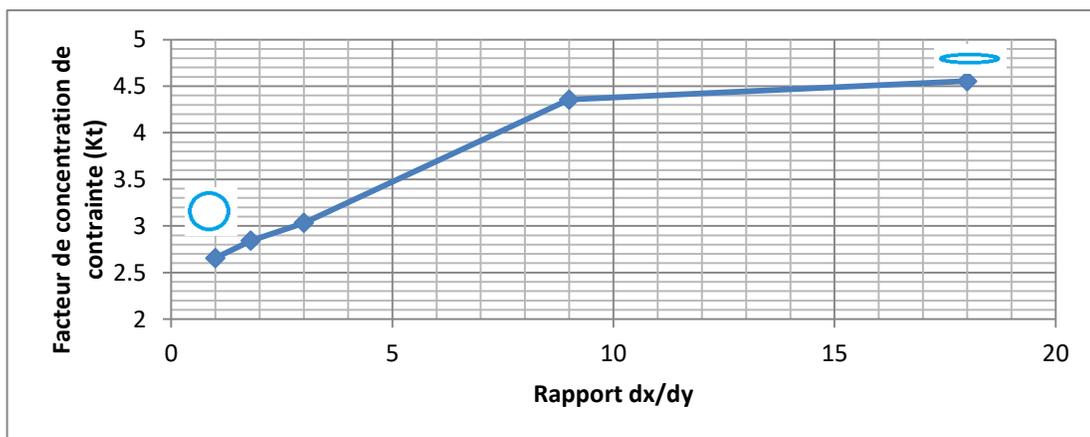


Figure V. 11 Variation du facteur de concentration de contrainte en fonction de la forme du trou (rapport dx/dy, $d_x=18$ fixe)

V.2.6 conclusion

Dans le présent travail, la méthode des éléments finis a été utilisée pour étudier les effets d'un trou induit dans une plaque droite. Les paramètres géométriques tels que la taille et la forme du trou sont les variables de cette étude. Les principaux résultats de ces simulations sont résumés comme suit:

- Les contraintes sont situées au voisinage de l'interface entre la plaque et le trou. Loin de l'interface, la plaque est totalement libre de ces contraintes.
- Sur la base de l'hypothèse d'un trou sphérique, la répartition des contraintes révèle une concentration autour du pôle, principalement dans la direction y (S_{YY}). Cette contrainte atteint un niveau élevé à un point situé sur le bord du trou (A et B). Ainsi, *une fissure peut être propagée à partir de ce point, qui présente un risque réel de défaillance de structure.*
- Le facteur de concentration de contrainte est sensible à la taille du trou. Il a été observé que K_t devient de plus en plus intense proportionnellement au diamètre du trou.
- La contrainte normale selon la direction y prend un niveau élevé. Lorsque le trou devient aigu, cette concentration augmente rapidement et devient de plus en plus faible. Ainsi, les trous sphériques sont moins dangereux par rapport à ceux aigus.

V.3 Partie 2 : Effet de différents types de défauts sur le comportement mécanique d'une plaque en traction

V.3.1 Introduction

Dans la mécanique élastique linéaire de la rupture, le champ de contrainte au voisinage d'un défaut est singulier, cette singularité varie selon la forme et la taille du défaut. Les fissures sont les défauts qui induisent la plus forte singularité. En élasticité linéaire, le champ de contrainte dans une structure en présence d'une fissure est donné en $1/(r)^{1/2}$ (r est le rayon d'un cercle centré sur la pointe de la fissure), avec un facteur multiplicateur qui est le facteur d'intensité de contrainte K et une dépendance angulaire. Plus le rayon est faible plus on s'approche de la pointe et plus les contraintes sont singulières. En élasticité linéaire, l'utilisation de la MEF (Méthode des Éléments Finis) avec les lois de la mécanique de la rupture afin de traiter le problème d'une plaque contenant un défaut de forme latéral, permet de confirmer le résultat de la Théorie de *Griffith*. Trois types de défauts avec différentes tailles ont été traités : un demi-cercle de différents rayons, une entaille avec différents angles d'ouverture et une fissure de différentes longueurs.

V.3.2 Problème traité

V.3.2.1 Définition du problème

Une plaque rectangulaire contenant un défaut latéral d'une certaine forme (demi-cercle, entaille latérale ou fissure) est étudiée. On fait varier la taille du défaut en faisant changer les dimensions caractéristiques de celui-ci. C'est le rayon pour le défaut de type demi-cercle, c'est l'angle d'ouverture (la profondeur de l'entaille est considérée constante) dans le cas d'une entaille et pour la fissure, c'est sa longueur. Les dimensions de la plaque considérée sont : une épaisseur $e = 2.5\text{mm}$ et une largeur $W=50\text{mm}$.

Le chargement appliqué et les conditions aux limites sont représentés sur la figure V.12, 13. Le chargement appliqué F est une traction constante uniformément répartie sur la partie supérieure de la plaque et dans la direction de la longueur. La charge F est de 600Mpa et la partie inférieure de la plaque est encastree.

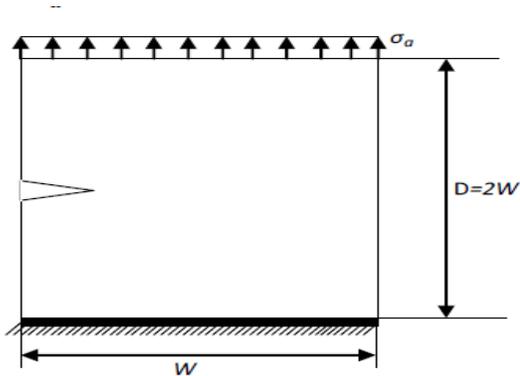


Figure V.12 Géométrie de la plaque

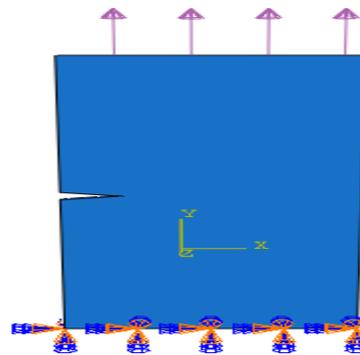


Figure V.13 Modélisation par ABAQUS

On note «Ligament », la longueur du ligament qui est la partie de la plaque partant du défaut jusqu'à l'autre arrête de la plaque. Le matériau constitutif de la plaque est un acier (figure V.14).

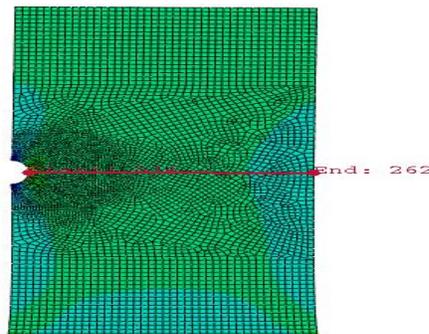


Figure V.14 Maillage modèle avec ligne de ligament

Acier API 5L X70 dont les caractéristiques mécaniques sont résumées dans le tableau suivant.

Matériau	Module de Young E (Mpa)	Coefficient de Poisson ν	Limite élastique à la traction $\sigma_{E0.2}$ (MPa)	Résistance à la rupture en traction R_r (MPa)	Masse volumique (Kg/m ³)
Acier API 5L X70	210000	0.3	483,03	673,14	7850

Tableau V.1 Caractéristiques mécaniques de l'acier API 5L X70

V.3.2.2 Résolution

Suite à la faible épaisseur de la plaque (Plaque mince), L'hypothèse posée est l'état plan de contraintes. La résolution du problème se fait numériquement en utilisant une méthode numérique puissante connue pour résoudre des problèmes compliqué avec géométrie complexe, cette méthode est celle des Eléments Finis (MEF). La simulation est effectuée par le logiciel ABAQUS version 6.16, qui est basé sur la MEF [36].

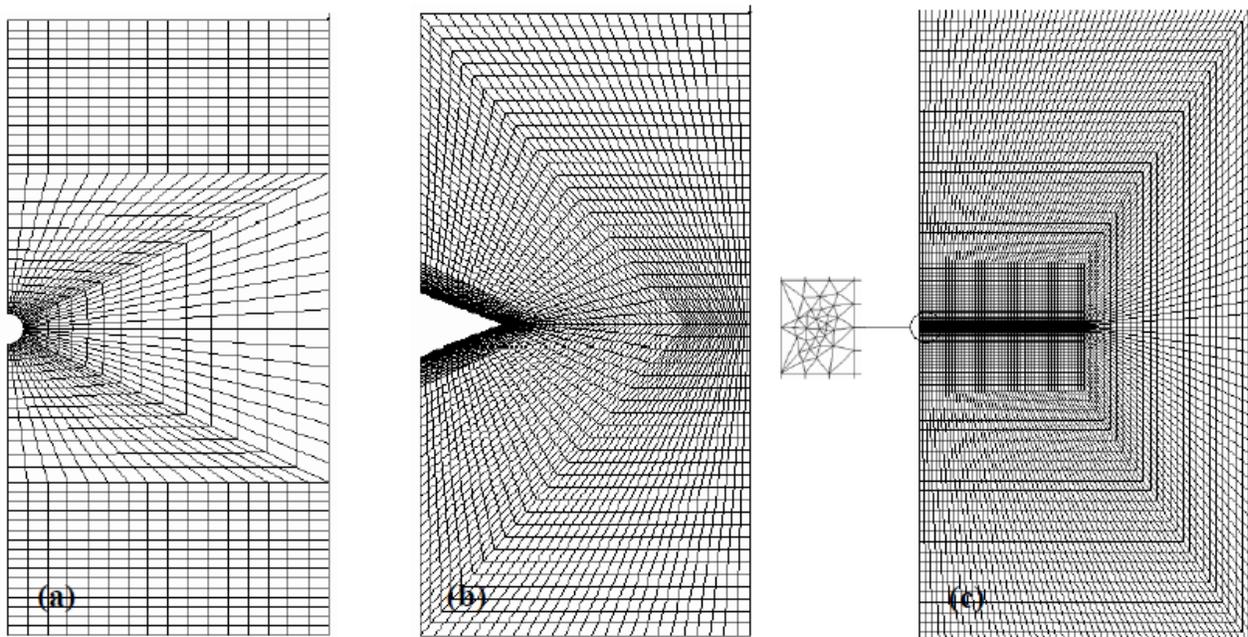


Figure V.15 Maillage de la plaque avec un défaut latéral de type : a/ demi-cercle ; b/ entaille et c/ fissure.

Le maillage de la plaque pour différents type de défauts est représenté sur la figure V.15. Il est réalisé en utilisant des éléments rectangulaires isoparamétriques à 8 nœuds, en ce qui concerne le défaut demi-circulaire, entaille et fissure, une discrétisation grossière est réalisé dans

la zone lointaine du défaut, par contre un raffinement du maillage est indispensable à proximité du défaut, ce qui permettra d'obtenir une bonne convergence et une meilleurs précision des résultats. Le maillage est effectué grâce aux outils développés du maillage du logiciel ABAQUS, les données de la géométrie et du maillage sont transférées automatiquement au module d'analyse par le logiciel. Les résultats calculés pour les trois types de défauts considérés, sont la distribution des contraintes sur toute la surface de la plaque (figure V.16.a, b, c), la contrainte le long du ligament (sur une ligne horizontale passant par la pointe du défaut) (figure V.17.a,b,c) ainsi que le facteur d'intensité de contraintes K_I et le taux de restitution d'énergie élastique G_I (figure V.19.a, b, c, d, e, f).

V.3.2.3 Résultats

a) Champ de contraintes

La figure V.16 représente le champ de contraintes de Von Mises en fonction du rayon (3, 6, 9,12 et15mm) dans le cas du défaut demi-circulaire (figure V.16.a). En fonction de l'angle d'ouverture (10°, 15°, 25°, 40° et 60°) dans le cas de l'entaille (figure V.16.b) et en fonction de la longueur du défaut dans le cas de la fissure (3, 6, 9,12 et15mm) (figure V.16.c).

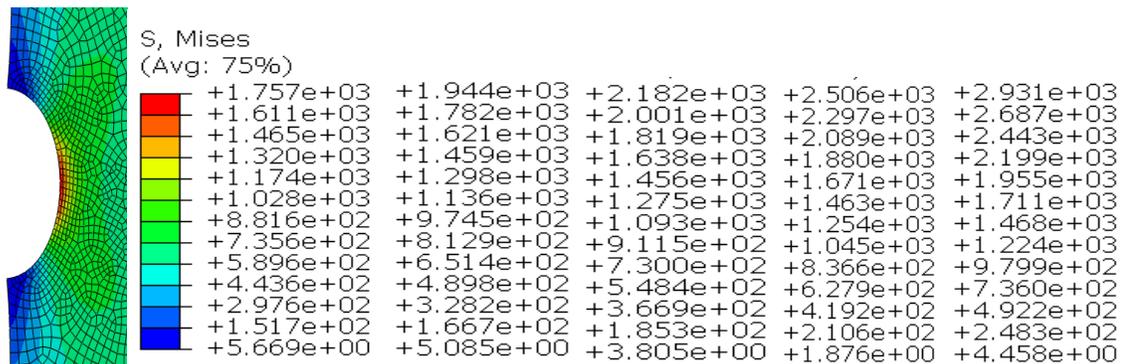


Figure V.16.a Champ de contraintes de Von Mises en fonction du rayon- demi-cercle

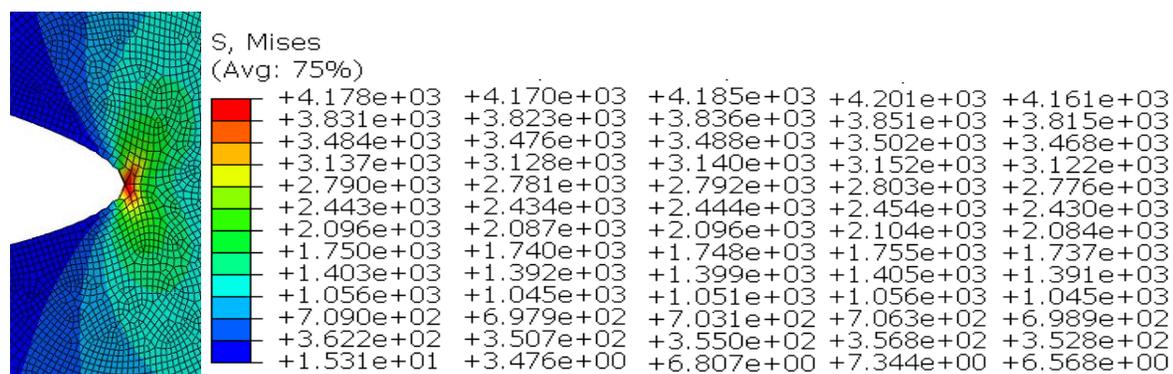


Figure V.16.b Champ de contraintes de Von Mises en fonction de l'angle d'ouverture- entaille

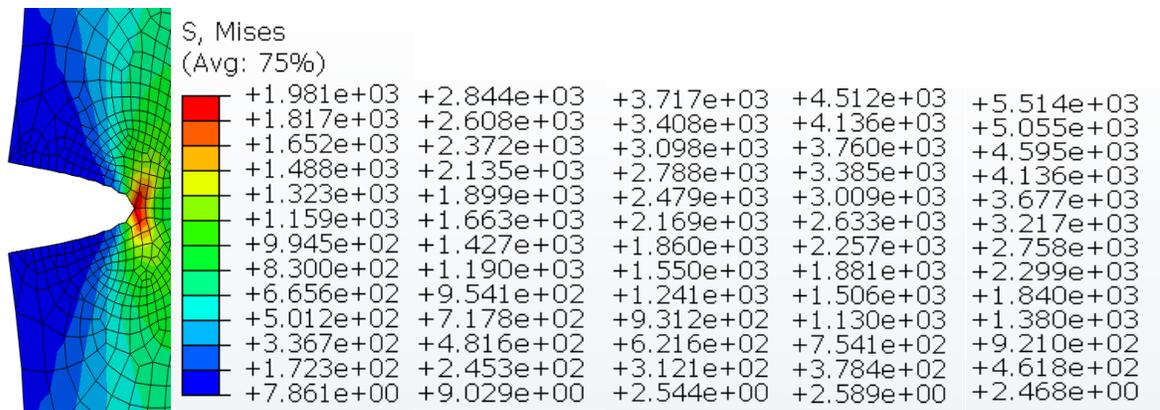


Figure V.16.c Champ de contraintes de Von Mises en fonction de la longueur du défaut-fissure

a-1) Discussions

On remarque que les contraintes sont concentrées au niveau du défaut, cette concentration diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de celui-ci. La concentration de contrainte augmente avec l'accroissement du rayon du demi-cercle et de la longueur de la fissure. Dans le cas de l'entaille (figure V.16.b), les contraintes sont variées peu avec l'angle d'ouverture, il faut noter que pour des petits angles d'ouverture, l'entaille tend vers une vraie fissure (entaille fermé) et d'après la théorie de Griffith, les fissures engendrent des concentrations de contrainte importantes au voisinage de la pointe de fissure.

b) la contrainte adimensionnelle

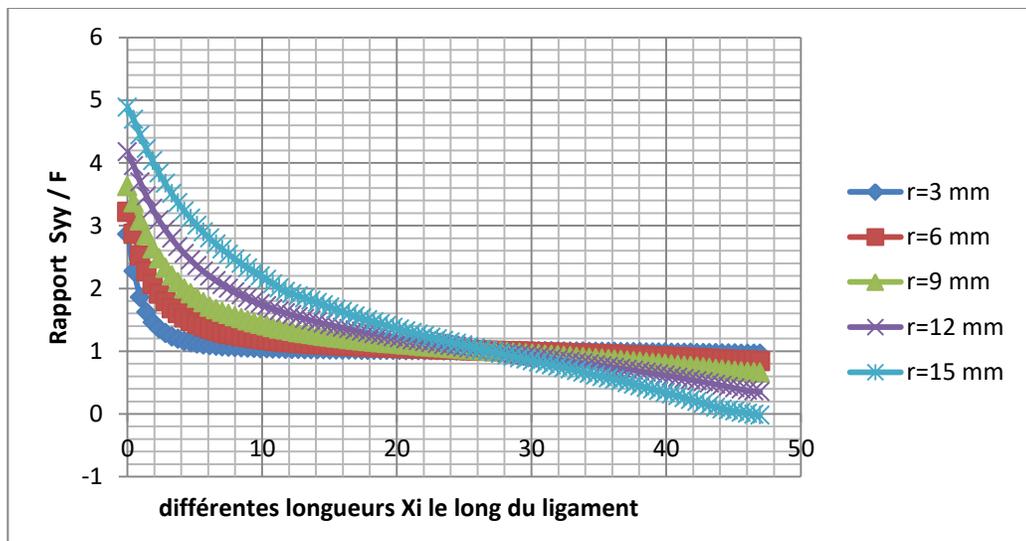


Figure V.17.a Variation de la contrainte adimensionnelle σ_{yy}/F pour différents rayons du demi-cercle

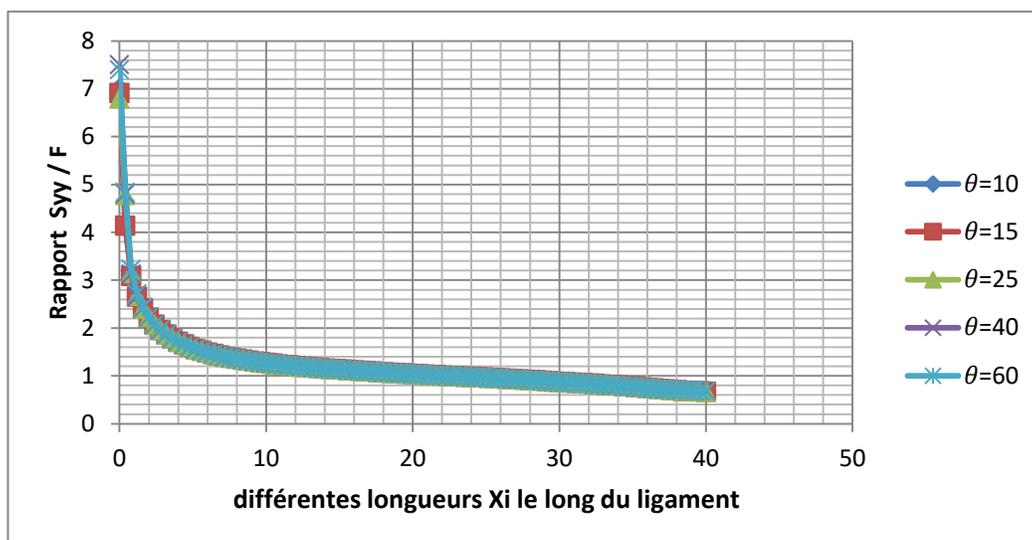


Figure V.17.b Variation de la contrainte adimensionnelle σ_{yy}/F pour différents angles d'ouverture de l'entaille

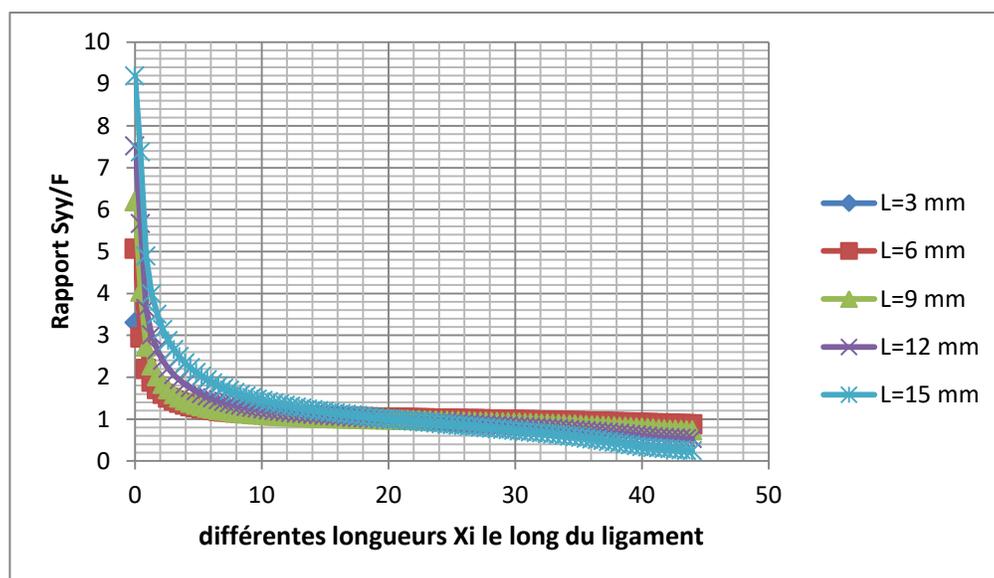


Figure V.17.c Variation de la contrainte adimensionnelle σ_{yy}/F différentes longueurs de la fissure

b-1) Discussions

Il est intéressant de voir la distribution des contraintes dans la direction du chargement le long du ligament, en partant du défaut. Les figures V.17.a,b,c représentent les valeurs de la composante du champ de contrainte normale adimensionnelle σ_{yy} pour les différents types de

défaut.

Sur la figure V.17.a sont représentées les valeurs de σ_{yy}/F pour un défaut demi-circulaire latéral. Les valeurs importantes sont au voisinage direct du défaut, elles diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de ce dernier. Il faut noter que plus le rayon est grand, plus les valeurs de la contrainte augmentent. Pour toutes les valeurs du rayon, les graphes coïncident au milieu du ligament ($r/W=0.4$) et tendent vers des valeurs proches. Sur la partie droite du ligament l'inverse est observé et les valeurs des contraintes calculées sont plus faibles pour de grands rayons du défaut, ceci est due à la déformation de la plaque contenant un défaut de type demi-circulaire latéral.

La figure V.17.b représente les valeurs de la composante du champ de contrainte σ_{yy}/F pour le défaut de type entaille. Il s'avère que les plus grandes valeurs sont au voisinage de la pointe et sont celles qui correspondent à l'entaille avec le plus petit angle d'ouverture (conformément aux résultats obtenus pour une fissure qui est considérée comme un défaut fermé), puis ils diminuent légèrement avec l'augmentation de l'angle d'ouverture. On remarque que les valeurs de σ_{yy}/F sont très proches le long du ligament en s'éloignant du défaut. En conclusion, l'angle d'ouverture de l'entaille a peu d'influence sur le champ de contrainte dans le ligament.

Pour le cas du défaut de type fissure, les valeurs de la contrainte σ_{yy}/F le long du ligament pour différentes longueurs de la fissure sont représentées sur la figure V.17.c. Au voisinage de la pointe, les valeurs calculées de σ_{yy}/F sont faibles pour des petites longueurs de la fissure, les contraintes augmentent ensuite avec l'accroissement de la taille de la fissure. Loin de la pointe (on s'éloignant de la pointe vers la partie droite du ligament), les valeurs de σ_{yy}/F tendent à se rapprocher. On peut dire que pour un défaut de type fissure, les contraintes au voisinage de la pointe sont plus sensibles à la taille du défaut, cette sensibilité diminue tout en s'éloignant de la pointe.

V.3.2.4 Influence de la forme du défaut sur les valeurs de KI et GI

On considère une petite fissure de 0.5 mm de longueur localisée au fond d'un défaut latéral demi-circulaire et au fond d'un autre en forme d'entaille (figure V.18). Différents rayons et angles d'ouverture ont été envisagés pour les défauts de formes demi-circulaires et entaille, respectivement. Les valeurs du facteur d'intensité de contrainte K_I et le taux de restitution d'énergie élastique G_I , pour les deux cas et le cas d'une fissure latérale sont représentés sur les figures V.19.a, b, c, d, e, f.

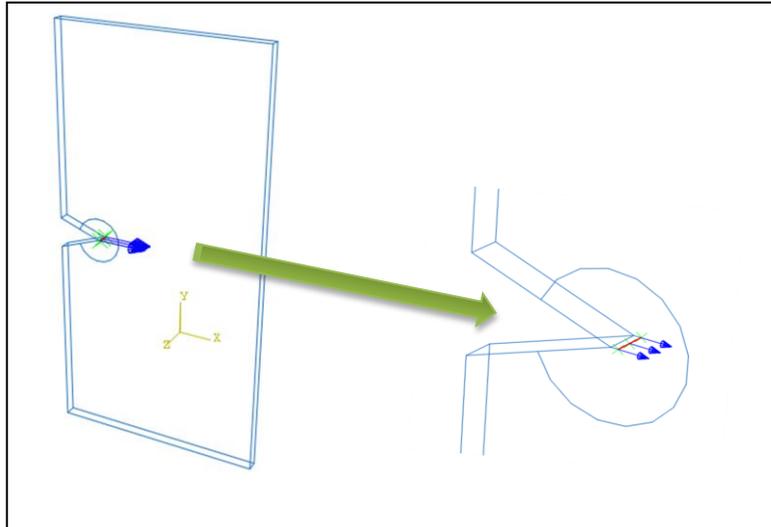


Figure V.18 Exemple de création de pré-fissure de 0.5mm-cas de l'entaille

a) présentation du resultat

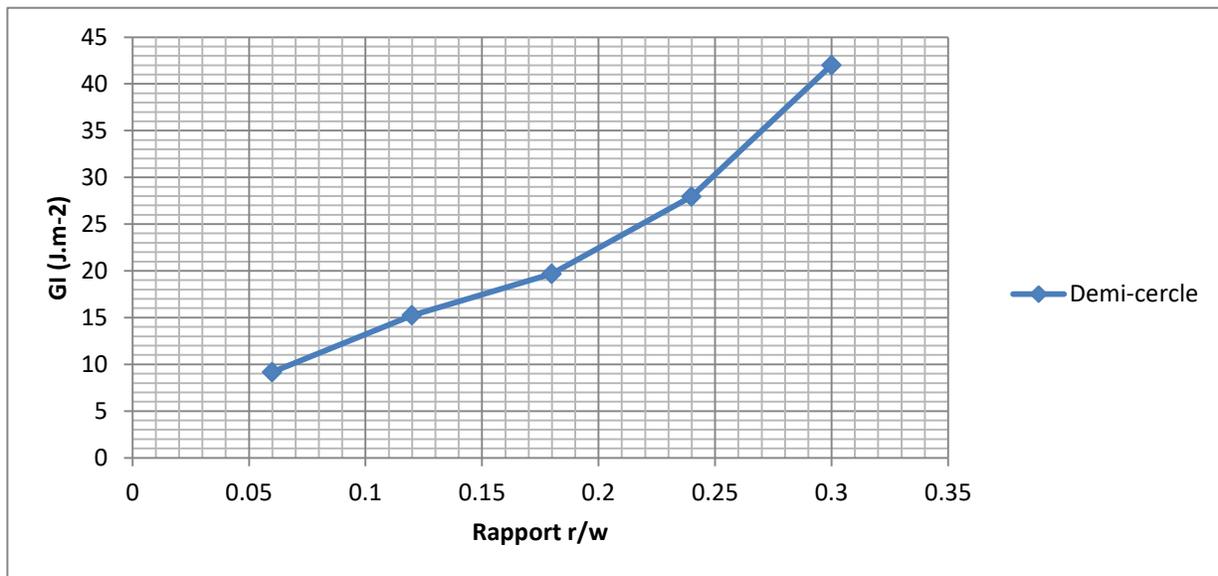


Figure V.19.a Variation de G_I en fonction du rayon du demi-circulaire

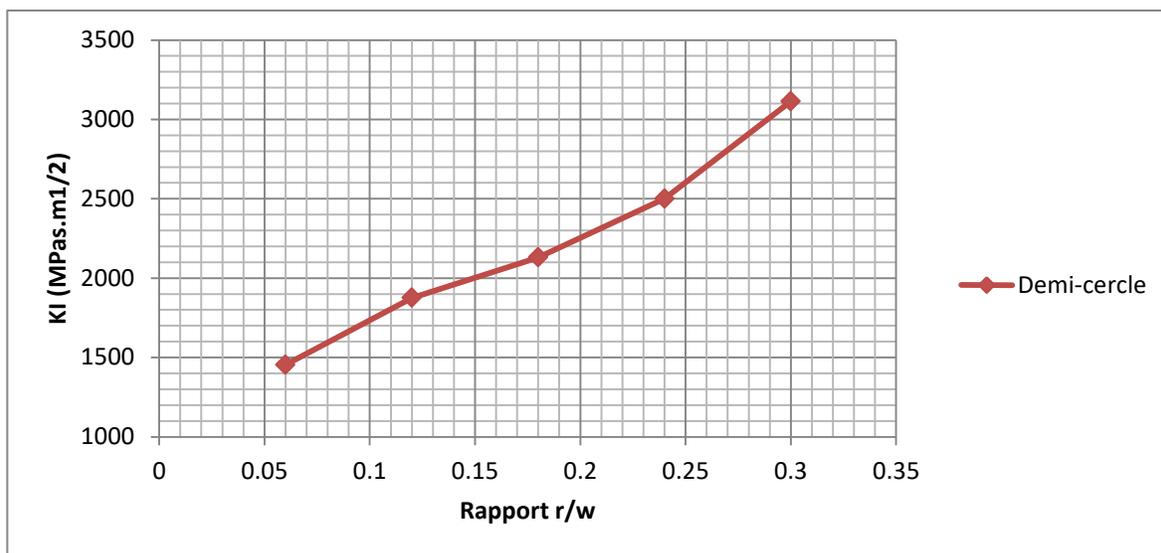


Figure V.19.b Variation de K_I en fonction du rayon du demi-circulaire

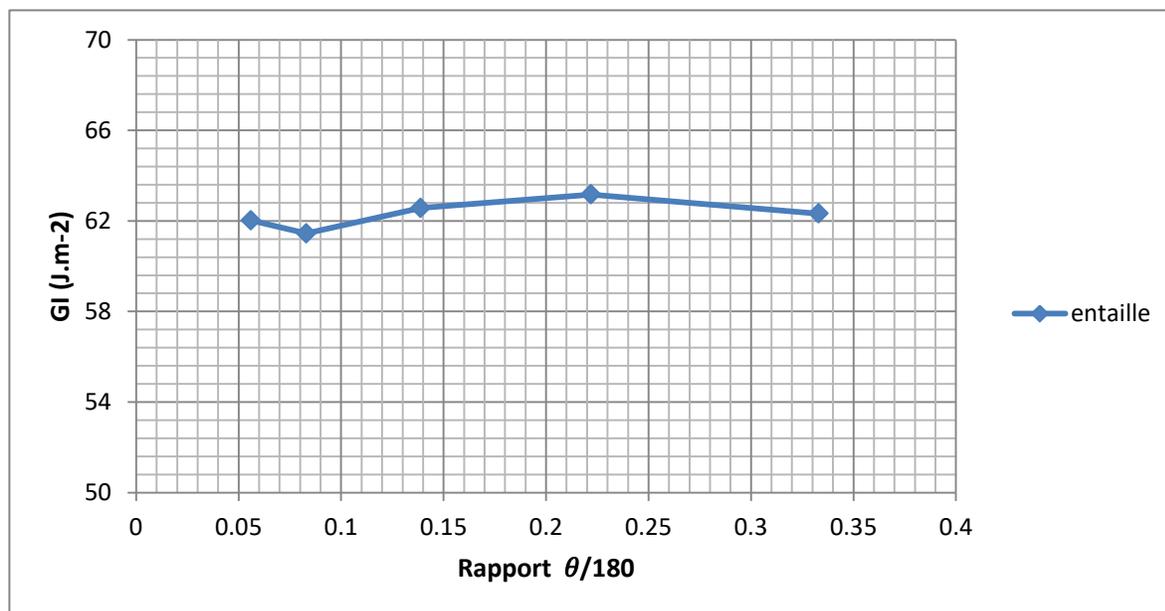


Figure V.19.c Variation de G_I en fonction de l'angle d'entaille

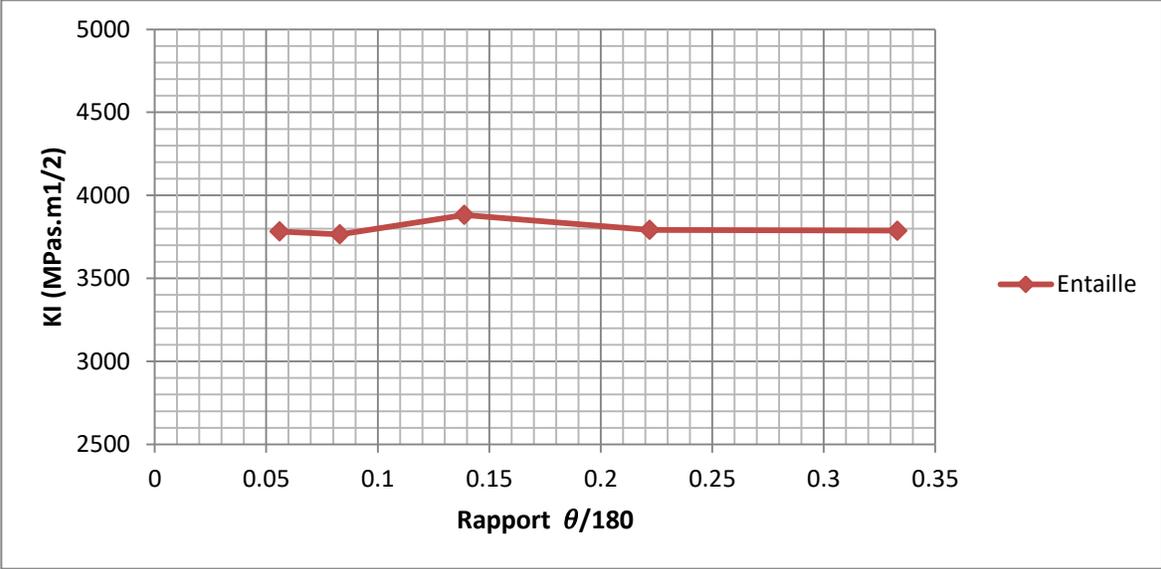


Figure V.19.d Variation de K_I en fonction de l'angle d'entaille

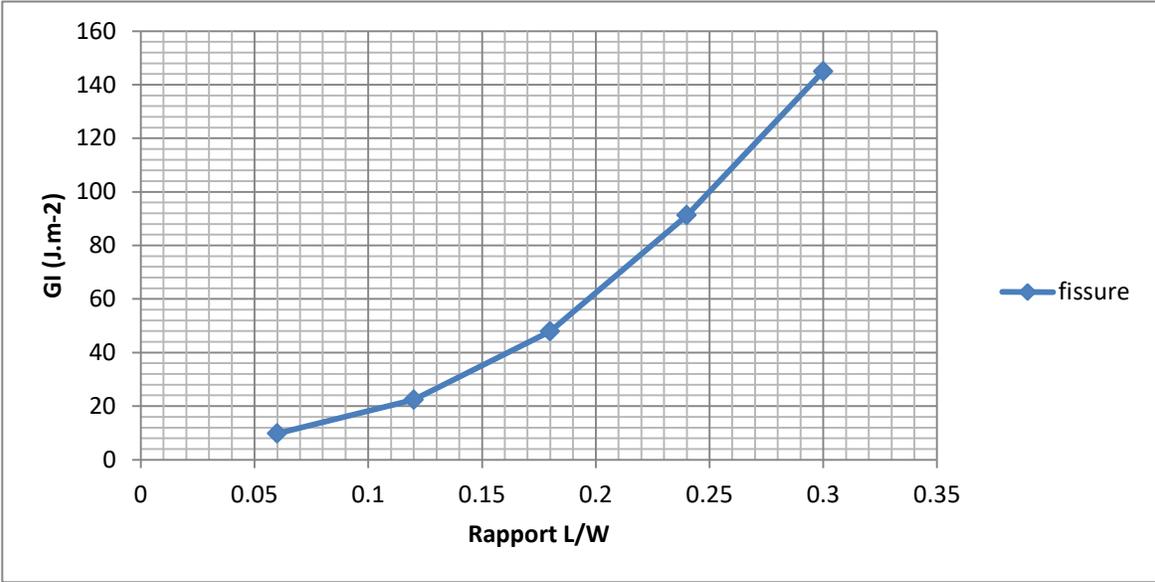


Figure V.19.e Variation de G_I en fonction de la longueur de la fissure

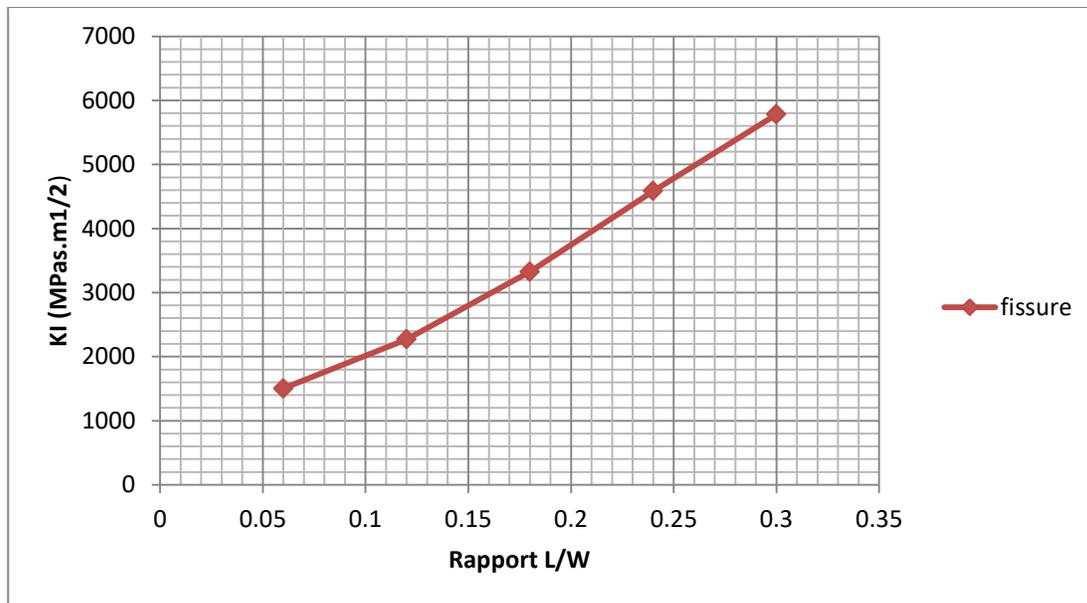


Figure V.19.f Variation de K_I en fonction de la longueur de la fissure

b) Discussions

D'après la figure V.19, le facteur d'intensité de contraintes K_I et le taux de restitution d'énergie G_I sont très sensibles au rayon du défaut demi-circulaire et augmentent considérablement avec ce dernier. Par contre, pour le défaut de type entaille, les facteurs K_I et G_I varient très peu avec l'angle d'ouverture et on peut dire qu'ils sont quasiment constants. Pour le cas d'une fissure latérale les valeurs les facteurs K_I et G_I varient avec la taille de la fissure et peuvent atteindre des valeurs élevées comparées aux autres types de défauts.

V.3.2.2 Conclusion

La présente étude paramétrique a permis de tirer des conclusions sur l'influence du type et de la taille d'un défaut sur le comportement mécanique d'une plaque mince soumise à un effort de traction. Il s'avère que les défauts de type demi-circulaire latérale sont des défauts qui engendrent les plus faibles contraintes par rapport aux autres types de défauts, à savoir les entailles et les fissures. Les entailles sont caractérisées par l'angle d'ouverture, le champ de contraintes est plus sensible aux entailles de faible ouverture conformément aux résultats analytiques obtenus pour une fissure (entaille fermée). Les fissures sont les défauts qui ont le plus d'influence sur le champ de contraintes qui est très sensible à la taille de la fissure.

Conclusion générale

Conclusion générale

Comme il a été signalé au début, que l'objectif de ce présent travail a été consacré à faire une modélisation numérique concerne l'analyse tridimensionnelle de concentration de contraintes dans une plaque trouée en traction et l'effet de différents types de défaut sur le comportement mécanique d'une plaque en traction.

Dans un premier temps, nous avons présenté une caractérisation expérimentale de l'acier API 5L X70 qui est utilisé pour la fabrication des pipelines au niveau de l'entreprise ALFAPIPE GHARDAIA et d'étudier également l'influence de la présence d'un trou circulaire et d'une fissure dans des éprouvettes droites soumises à un chargement de traction sur l'évolution des propriétés mécaniques de l'acier.

En second lieu, nous avons utilisé le logiciel de calcul ABAQUS, dans sa version 6.16, qui représente l'un des outils numérique basée sur la méthode des éléments finis, afin de traiter le problème d'une plaque contenant un défaut de forme latéral, permettant ainsi de confirmer le résultat de la Théorie de Griffith.

Les résultats obtenus nous ont permis de conclure ce qui suit :

- L'acier API 5L X70 utilisé pour la fabrication des pipelines possède des propriétés particulières répondant bien aux conditions de choix pour une telle utilisation à cause de sa haute limite élastique, de sa bonne ductilité avec une microdureté largement admissible.
- Le cordon de soudure utilisé pour le soudage des pipelines possède une résistance à la rupture et une microdureté supérieures à celles du métal de base et une résilience inférieure à celle de la ZAT et du métal de base.
- Les trous de tailles importantes conduisent à de forts facteurs d'intensité de contraintes. Ce comportement montre clairement que la présence des trous dans une plaque est un siège de concentration de contraintes pouvant conduire à l'amorçage et la propagation de fissures.
- Lorsque le trou devient aigu, cette concentration augmente rapidement et devient de plus en plus faible. Ainsi, les trous sphériques sont moins dangereux par rapport à ceux aigus.
- le facteur d'intensité de contraintes K_I et le taux de restitution d'énergie G_I sont très sensibles au rayon du défaut demi-circulaire et augmentent considérablement avec ce dernier. Par contre, pour le défaut de type entaille, les facteurs K_I et G_I varient très peu avec l'angle d'ouverture et on peut dire qu'ils sont quasiment constants. Pour le cas d'une fissure latérale les

valeurs des facteurs K_I et G_I varient avec la taille de la fissure et peuvent atteindre des valeurs élevées comparées aux autres type de défauts.

- Les défauts de type demi-circulaire latérale sont des défauts qui engendrent les plus faibles contraintes par rapport aux autres types de défauts.
- Les fissures sont les défauts qui ont le plus d'influence sur le champ de contrainte qui est très sensible à la taille de la fissure.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] <http://www.alfapipedz.com/spip.php?article11> (2010).
- [2] <https://www.google.dz/maps/place/ALFAPIPE/@35.1004338,5.2107814,6z/data=!4m2!3m1!1s0x126429adb2f3e009:0x51d2bf248d1957d8?hl=fr> (2015).
- [3] <https://www.google.dz/maps/place/ALFAPIPE/@32.6439535,4.054882,8z/data=!4m2!3m1!1s0x126429adb2f3e009:0x51d2bf248d1957d8?hl=fr> (2015).
- [4] <http://www.alfapipedz.com/spip.php?article15> (2010).
- [5] <http://www.alfapipedz.com/spip.php?article12> (2010).
- [6] laboratoire mécanique Alfapipe Ghardaia.
- [7] <http://www.alfapipedz.com/spip.php?article14> (2010). [28] Naftal News, document numérique, a partir : www.naftal.dz (2010).
- [8] AGGOUNE F., «Evaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation», Mémoire de Magister en Génie Mécanique, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [9] BENDJEBBOUR A., «Corrosion localisée des aciers API 5LX52 de la ligne ASR/MP solliciteen sol algérien», Mémoire de Magister en Génie Mécanique, Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, 2011.
- [10] <http://www.sonatrach.com/transport-par-canalisation.html> (2015)
- [11] ROOS A. et MILET B., «Précis de métallurgie Appliquée », Edition Technique et Documentation-Lavoisier, 1982.
- [12] GRANJON H., «Bases métallurgiques du soudage», Institut de Soudure (SI), 2000.
- [13] Gilbert R., «Soudage et assemblage-soudage», le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI) en collaboration avec le Centre d'élaboration des moyens d'enseignement du Québec (CEMEQ), 2010.
- [14] Wang C., Xingfang W.J., «Transmission electron microscopy of martensite, austenite, islands in pipeline steel X70», Materials Science and Engineering, 2006.
- [15] CAZES R., «Soudage à l'arc», Technique d'ingénieur, 1995.
- [16] MAROUF H., «Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier antiusure NAXTRA70 utilisé par l'Unité Grue de Bejaïa dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation», Mémoire de Magister en Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [17] BARTHELEMY B., «Notions pratiques de mécanique de la rupture », Eyrolles, 1980.
- [18] BOUZIANE A., «Contribution à la détermination des critères des qualités des tubes soudés soumis à une pression intérieure», Thèse de Magistère en génie mécanique, Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, 2008.
- [19] RAMDANI Mohammed «Etude mécano fiabiliste sur le comportement en corrosion localisée des aciers API-5L-X60 pour pipeline : modèle basé sur la ténacité», Thèse de magister en génie mécanique, Université ABOU BEKR BELKAID de Tlemcen, 2008.

- [20] Prof. G.Cailletaud « Mécanique des solide » ENS Mines de Paris
- [21] J.C.Charmet « mécanique du solide et des Matériaux- Elasticité ; Plasticité ; Rupture » ESPCI. Laboratoire d'hydrodynamique et mécanique physique : .pmmh.espci.fr/fr/.
- [22] A.Guedri « Conception et simulation numérique des caractéristiques mécanique des pipelines ». Thèse Doctorat : Université Badji Mokhtar.2008.
- [23] Hai Nam Le “ Etude de la propagation d'une fissure sous chargement thermique cyclique induisant un gradient de température dans l'épaisseur” Thèse de Doctorat de l'Ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique. France. 12 Mai 2009.
- [24] D.R. Moore ; A.Pavan and J.G.Williams. “Fracture Mecanics for polymers adhesives and Composites” ESSIS; Publication 28; Elsevier 2001.
- [25] M.Bettayeb « Contribution à l'étude de la fiabilité en présence de défauts de joints de soudures et de corrosion, dans les canalisations de transport d'hydrocarbures». Thèse Doctorat : Universite M'hamed Bougara-Boumerdes. 2016.
- [26] «Welding pressure pipelines & piping systems», Ed. The Lincoln electric company, 2000.
- [27] AMARA ZENATI A., «Étude du comportement des aciers API 5L X60 sollicités par contraintes mécaniques et milieu de sol Algérien Simulé», Thèse doctorat en Génie Mécanique, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2013.
- [28] <http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap4/site/html/3.html> (2010).
- [29].AlfaPipe Tuberie de Ghardaia, Département assurance qualité, Ordre d'exécute fabrication et contrôle, 2017.
- [30] ROOS A. et MILET B., «Précis de métallurgie Appliquée », Edition Technique et Documentation- Lavoisier, 1982.
- [31] FAURIE (J.P.), MONNIER (P.) et NIKU-LARI (A.). Guide du dessinateur, les concentrations de contraintes. CETIM, 1977.
- [32] CETIM-CASTOR-RdM.
- [33] NEUBER (H.). – Theory of notch stresses. Office of Technical Services, 1961.
- [34] PETERSON (R.E.). – Stress concentration factors. John Wiley, 1974.
- [35] ABAQUS, User's Manual, 6.9, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.F.
- [36] ABAQUS/CAE User's Manual Version 6.10.
- [37] J. Simo et M. Rifai. A class of mixed assumed strain methods and the methods of incompatible modes.
International Journal for Numerical Methods in Engineering 1990. 29 : 1595–1638.
- [38] Needleman, Xu. Numerical simulation of fast crack growth in brittle solids. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 1994. Vol. 42: 1397–1434.
- [39] Aliabadi, M. H. Boundary element formulations in fracture mechanics. Applied Mechanics Review 1997. 50:83-96.

Annexes

A.1 Généralité

Notre étude a été réalisée par le logiciel de calcul ABAQUS. Il est utilisé par les plus grands établissements du monde comme la NASA [37] et (AIR BUS) [38].

Il a été créé en 1978 c'est un logiciel de calcul qui couvre plusieurs domaines d'ingénierie comme la mécanique, l'électronique, etc. Il s'applique à de nombreux types de disciplines telles que la mécanique de la rupture, la mécanique des fluides, le champ électrique, l'électrostatique, l'électronique, la biomécanique.....etc. Il permet aussi l'analyse simultanée de plusieurs projets couplés [39].

Abaqus permet de modéliser des structures à 2D et 3D et d'effectuer une analyse statique ou dynamique. Il permet aussi d'étudier le comportement des différents types de matériaux : Elastique, viscoélastique, élastoplastique, visco-élastoplastique ...etc. et aussi de traiter les problèmes linéaires et non linéaires.

A.2 Mise en données d'un problème

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les modules :

- **Part** : C'est dans ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle.
- **Property** : On y définit les propriétés du ou des matériaux (élastique, viscoélastiqueetc), il faut ensuite affecter ces propriétés à une entité du corps dessiné figure (A.1).
- **Assembly** : Dans ce module, il s'agit de créer une (voir plusieurs) instance(s) à partir des entités qu'on a définies dans le module part figure (A.3).
- **Step** : C'est dans ce module qu'on choisit le type d'analyse (statique, dynamique, transfert de chaleur,.....). C'est également dans ce module qu'on devra choisir les sorties désirées figure (A.4).
- **Interaction** : On définit dans ce module les interactions entre différentes entités du modèle, ce qui peut prendre la forme d'un contact (A.5).
- **Load** : On définira ici le chargement, les conditions aux limites figure (A.7) et figure (A.8).
- **Mesh** : Dans ce module est définie la nature des éléments choisis et leurs tailles figure (A.6).
- **Job** : Le lancement du calcul est classique. Après avoir lancé le calcul, on pourra suivre l'évolution du processus en cliquant sur monitor.

A.3 Exemple d'application (prendre le cas de fissures)

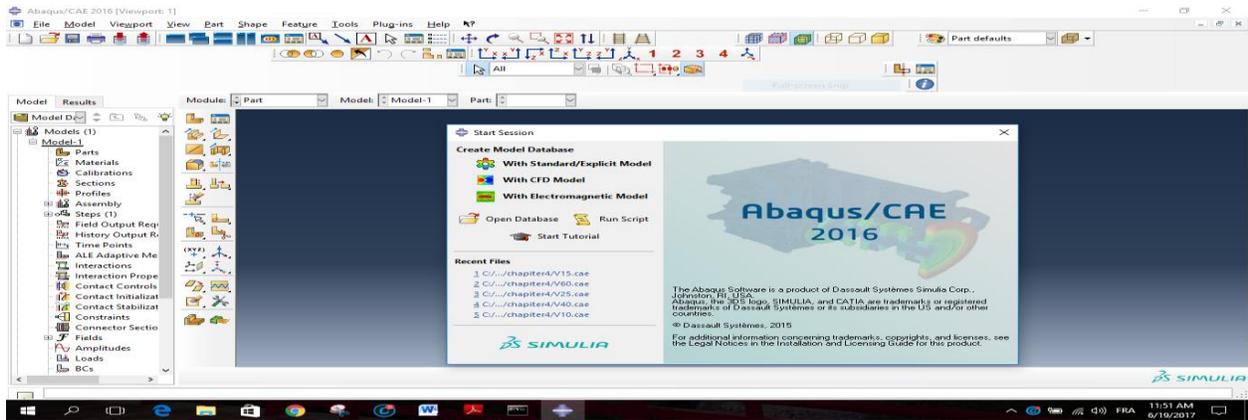


Figure A.1 Interface ABAQUS 6.16

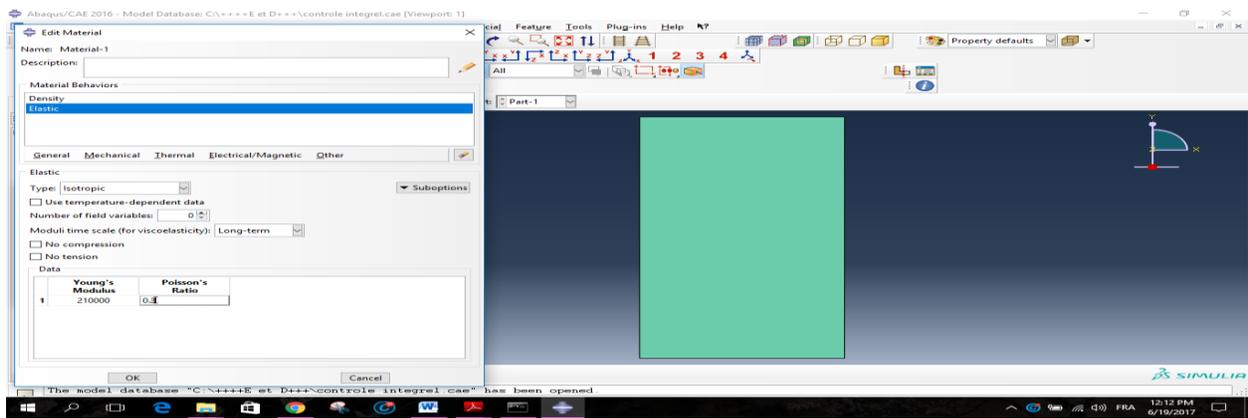


Figure A.2 Introduction des paramètres du matériau dans le module property

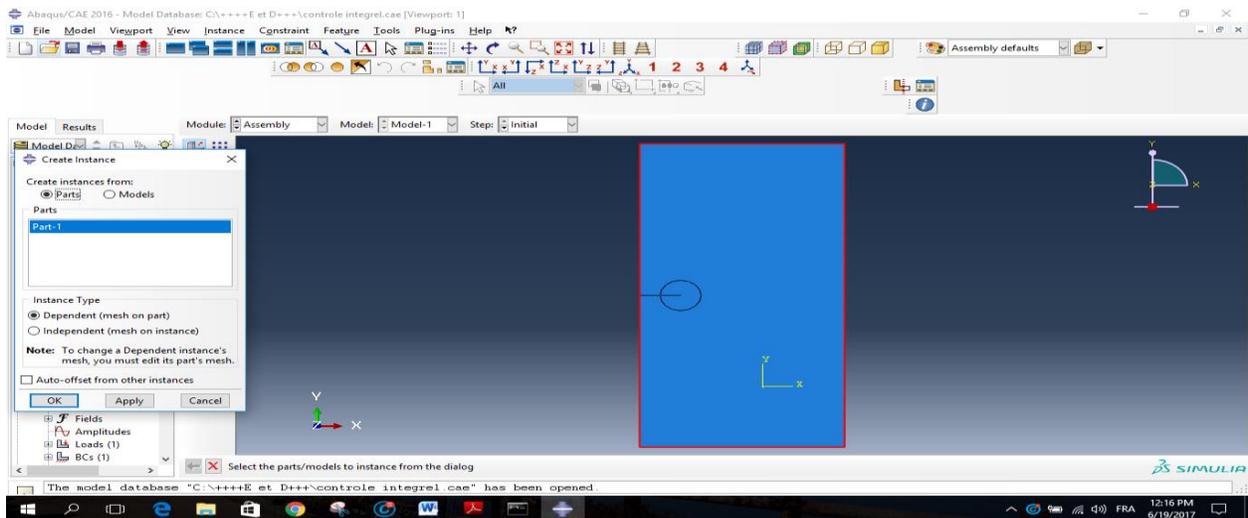


Figure A.3 Assemblage dans le module assembly, créer une instance

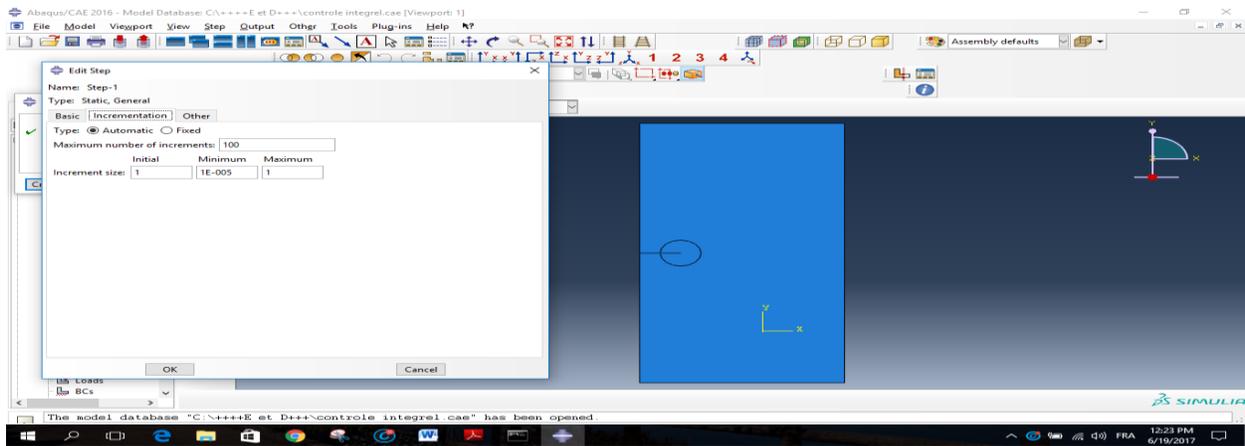


Figure A.4 Choix du type de calcul dans le module step

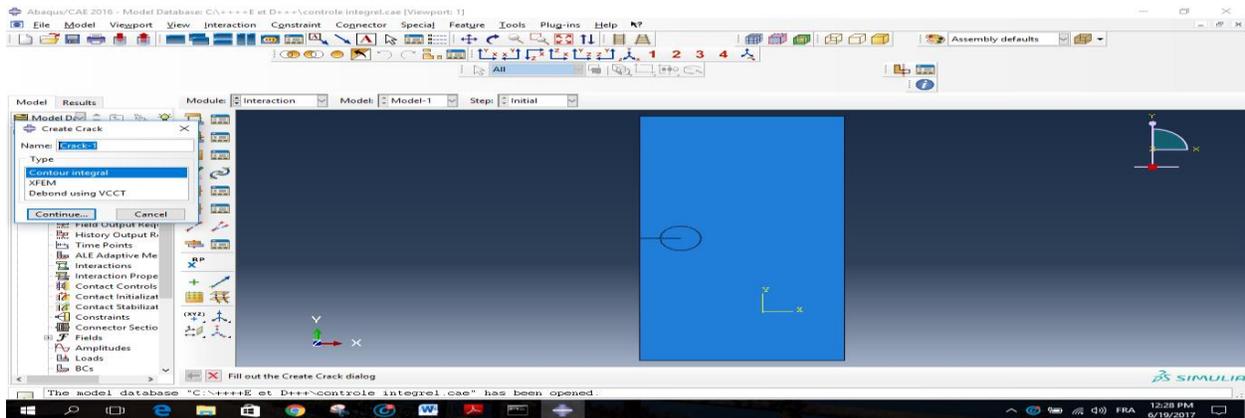


Figure A.5 Choix de la méthode 'contour integral' dans le module Interaction.

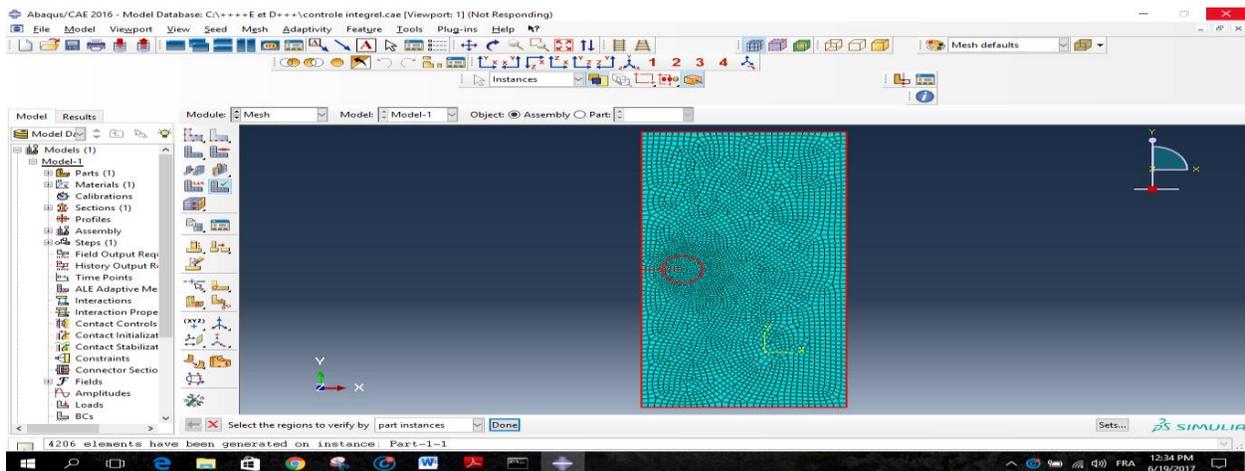


Figure A.6 Choix de la taille des éléments. Module mesh

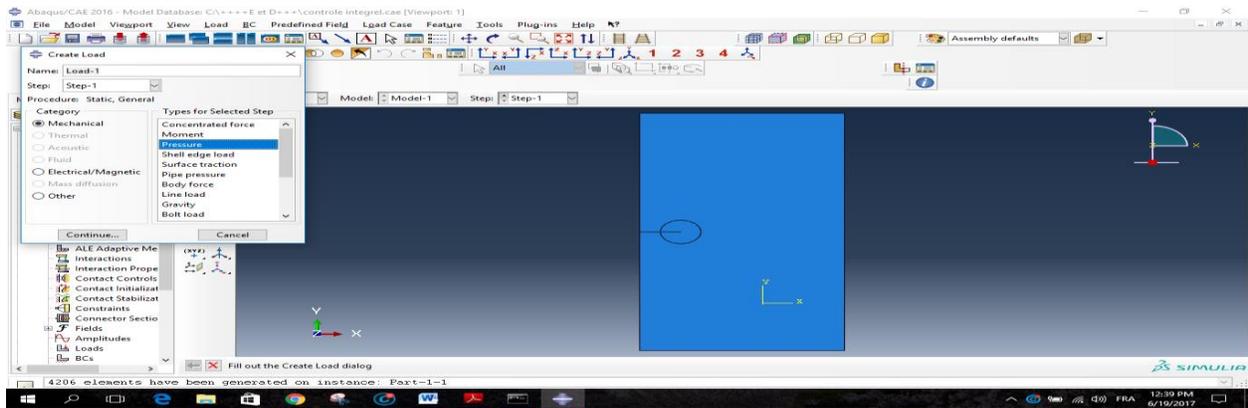


Figure A.7 Choix du chargement. Module Load

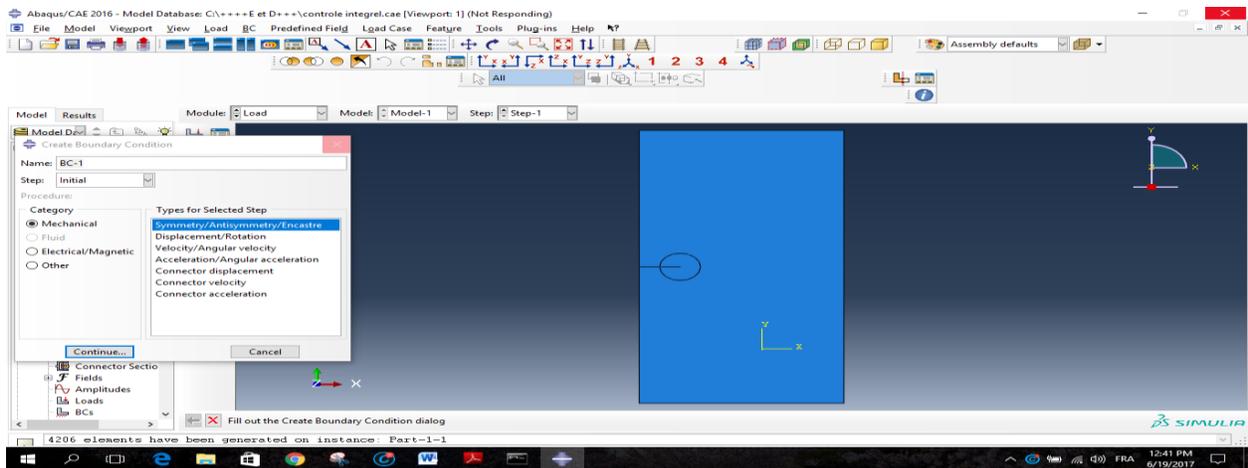


Figure A.8 Choix des conditions aux limites, cas d'une fissure interne. Module : Load

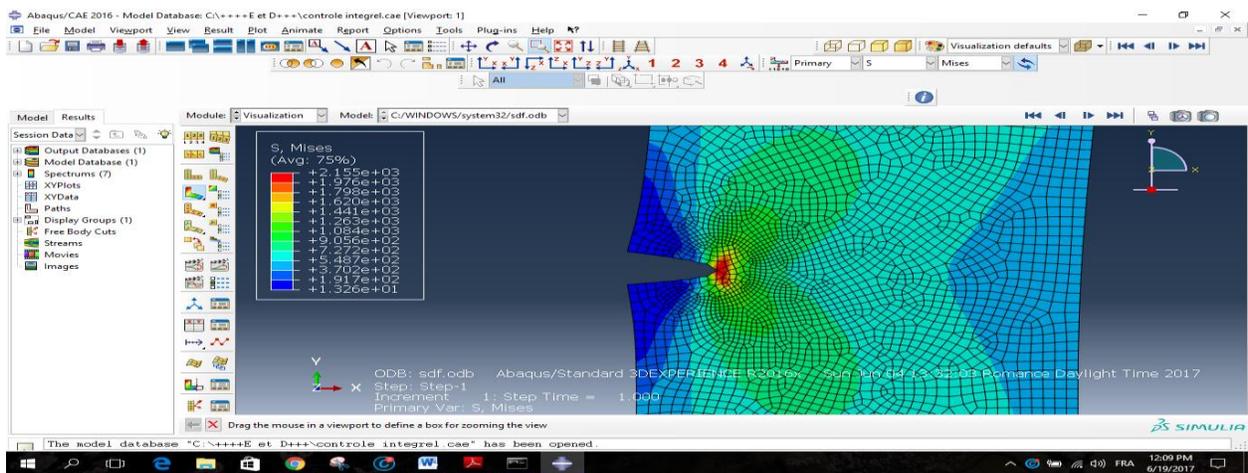


Figure A.9 Visualisation de l'évolution de la plaque sous chargement $P=600$ MPa, avec la répartition des contraintes de Von Mises : cas de fissures.

DESIGNATION	EXIGENCE
Limite élastique (Re)	Mini = 485 Mpa Maxi = 635 Mpa
Limite à Rupture (Rm)	Mini = 570 Mpa Maxi = 760 Mpa
Allongement (A%)	Mini = 22 %

Tableau B.1 Spécifications techniques pour l'essai de traction.

RESILIENCE KCV à -10 °C	
Métal de Base	100 J/ cm ²
Milieu de soudure ZAT ZAT+2	50 J/ cm ²

Tableau B.2 Spécifications techniques minimales pour l'essai de résilience.

Spécifications techniques pour l'essai de microdureté :

- La microdureté de cet acier est inférieure à 250 HV 10.
- La microdureté entre MB et soudure est inférieure à 60 HV 10.