

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE-MECANIQUE



MEMOIRE

de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en
génie mécanique
Option : sciences des matériaux

THÈME

*Etude et optimisation expérimentale et
numérique de la réparation des
entailles sur des plaques en
polyéthylène haute densité par la
technique du meulage*

Proposé et dirigé par :
M^r : M. ABERKANE

Réalisé par :
M^r : DJAMEL SERSAB

Promotion

2010-2011

REMERCIEMENTS

*En premier lieu, je remercie particulièrement mon promoteur monsieur **ABERKANE** d'avoir accepté de me diriger, et à tous ses conseils précieux dont il a su me faire profiter.*

D'autre part, mes plus vifs remerciements vont aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en ayant accepté la lourde tâche de l'examiner.

J'adresse également mes plus sincères salutations à tous les enseignants du département de génie mécanique en particulier ceux qui ont contribué à ma formation, et à tout le personnel de la bibliothèque.

Mes remerciements sont aussi pour les techniciens du laboratoire de Génie Civil pour leur disponibilité et leur sympathie.

*Enfin je tiens particulièrement à adresser un grand merci à **ma fiancée Samia** sans qui la réalisation de ce mémoire serait plus pénible que les événements qui me sont arrivés durant cette période.*

A mes compagnons de paillasse, et tous ceux qui ont contribué par leur humour et leur sympathie à rendre mon parcours universitaire mémorable et qui sont à présent plus que de simples collègues :
Koceila et Zohra, Hocine et Samia, Abderrahmane et Lydia,
Messaoud et daya, Amirouche et l'ENSEJ

Je tiens à dédier ce travail à mes parents qui n'ont jamais cessé de croire en moi ;

Merci à mon père et à ma mère pour les valeurs d'audace, de persévérance et de modestie qu'ils m'ont transmis. Ce diplôme de master, ainsi que tout espoir et fierté qui peuvent éventuellement en jaillir, sont aussi et tout naturellement les leurs.

J'adresse ma gratitude toute particulière et éternelle à ma famille, à mes frères et sœurs et à toutes leurs familles, et qui m'ont toujours épaulé moralement et financièrement pendant toutes ces années d'étude, malgré un système scolaire défaillant dans sa capacité à juger du réel potentiel d'un enfant à partir de simples bulletins de notes.

Du temps de l'Antique Empire Romain, un esclave murmurait : "souviens-toi que tu es mortel" à l'oreille de l'empereur lors de chaque triomphe... Une belle leçon d'humilité que certaines personnes devraient méditer.

Nomenclature

Abréviations

MF : métal fondu

Z L : zone de liaison

ZAT : zone affectée thermiquement

MB : métal de base

DMOS : descriptif de mode opératoire de soudage.

QMOS : qualification de mode opératoire de soudage.

PEHD : *polyéthylène haute densité*

PVC : polyvinyle de chlorure

PHMSA : Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (Administration des matériaux des pipelines et leurs)

PE : Polyéthylène

SENT : single edge notched tension

Sh : Seuil d'écoulement haut

Sb : Seuil d'écoulement bas

Lettres latines

- K_I : Facteur d'intensité de contrainte [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}^2}$]
- L :longueur [mm]
- W : largeur [mm]
- B : Epaisseur [mm]
- D_e : Diametre exterieur [mm]
- a : Profondeur du defaut [mm]
- R : Rayon de réparation [mm]
- J : integrale J de Rice [N.mm/mm²]
- W : Densité d'énergie de déformation [N.mm/mm²]
- T : Effort par unité de surface
- U : Energie dissipée (aire sous la courbe de tracion)
- W :Energie de déformation [J]
- P : Charge appliquée [MPa]
- E : Module de Young [MPa]
- u : Déplacement dans le sens des x [mm]
- v : Déplacement dans le sens des y [mm]
- k_t : facteur des concentration de contraintes
- R_e : Limite d'élasticité [MPa]
- a_1 : Constante de déformation
- l : longueur d'éprouvette [mm]
- V_c : Vitesse de coupe de la fraise [tour/minute]
- V_a : Vitesse d'avance de la table d'usinage [mm/minute]
- F_{\max} : Charge maximale expérimentale [KN]
- F_p : charge maximale numérique
- W_s : Energie de déformation à la formation de la striction [J]
- P : Charge appliquée [N]
- F_{moy} : Limite élastique moyenne [KN]

Lettres Grecs

Γ : Enveloppe du contour w

$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)$: Déplacement du contour selon x

r & θ : Coordonnées polaire du point considéré à partir du fond d'entaille .

δ : Déplacement des points d'applications de la charge

σ_{xx} : Contrainte normale selon x [MPa]

σ_{xx}^P : Contrainte longitudinale dans le patch [MPa]

σ_{xz}^a : Contrainte de cisaillement dans l'adhésif [MPa]

σ_{yy} : Contrainte normale selon y [MPa]

σ_{zz} : Contrainte normale selon z [MPa]

τ_{xy} : Contrainte de cisaillement [MPa]

ν : Coefficient de poisson

μ : Coefficient de cisaillement

ρ : Rayon du fond d'entaille [mm]

σ_{nom} : Contrainte nominale [MPa]

σ_1 : Contrainte de référence élastique

ε_{pr} : Déformation plastique effective en fond d'entaille,

ε_0 : Déformation élastique de référence et a_2 une constante.

σ_{max} : Contrainte maximale en fond d'entaille [MPa]

ϕ : Diamètre de la fraise d'usinage [mm]

σ_{yhard} : Contrainte d'écrouissage numérique

σ_{exp} : contraintes expérimentale [MPa] .

$\sigma_{ys} = \sigma_e$: Limite d'élasticité [MPa]

ε_{eff} : Déformation effective calculée par le code de calcul

ε_{pe} : Déformation plastique effective calculée par le code de calcul

LISTE DES FIGURES
ET
TABLEAUX

Liste des figures

Fig.I.1	soudage à l'arc.....	23
Figure.I.2	Principe du soudage à l'arc avec électrode enrobée.....	24
Figure.I.3	Cycle thermique de soudage.....	25
Figure.I.4	Structures et transformations métallurgiques du métal.....	26
Figure.I.5	fissuration à chaud.....	27
Figure.I.6	fissuration à froid.....	28
Figure I-7	(a)Macrographie d'une soudure avec soufflures ;(b) : Soufflures détectées par radiographie	29
Figure.I.8	Inclusions de laitier décelées par radiographie.....	30
Figure.I.9	Manques de fusion ou de pénétration.....	31
Figure.I.10	défauts de forme.....	32
Figure.I.11	exemple de réparation par boulonnage	33
Figure.I.12	assemblage par rivetage.....	33
Figure.I.13	fissuration sur trou.....	34
Figure.I.14	Modèle unidimensionnel d'une structure renforcée par un patch composite	35
Figure.I.15	Diverses formes de patchs composites.....	36
Figure.I.16	Structure fissurée et renforcée par un patch composite.....	37
Figure.I.17	Evolution du facteur d'intensité K_1 en fonction de la longueur de fissure.....	37
Figure.I.18	Exemple de réparation sur un avion Mirage.....	38
Figure.I.19	Exemple de réparation sur un avion Hercules.....	38
Figure.I.20	Exemples de patchs riveté et collé.....	39
Figure.I.21	Réparation des fissures sous un pont.....	40
Figure.I.22	traitement des fissures par calfeutrage.....	40
Figure.I.23	pontage d'une fissure avec incorporation d'une armature.....	41
Figure.I.24	Concept de l'autoréparation.....	43
Figure .II.1a	Développement de défaillance d'un pipeline.....	46
Figure.II.1b	Eclatements avec rupture franche de la canalisation.....	47
Figure.II.2	Type de fissure et leurs causes.....	48
Figure.II.3	les causes des défaillances des canalisations.....	49
Figure.II.4	incidents sérieux de canalisations sur tous les types de canalisations.....	49
Figure.II.5	opération de soudage d'une demi-coquille sur un pipeline corrodé	50
Figure.II.6	Défaut dans la zone du cordon de soudure, de dimensions	35
Figure.II.7	défaut usiné avec entaille en V sur le métal de base	51
Figure.II.8	Réparation du défaut par soudure d'une demi-coquille.....	52
Figure.II.9	réparation par l'époxyde + demi-coquille.....	52
Figure.II.10	réparation par ressorts d'horloge.....	53
Figure.II.12	Eraflure éliminée par meulage.....	54
Figure.II.13a	colmatage de fuite sous pression.....	55
Figure.II.13b	vue en plan d'un demi-manchon boulonnée pour arrêter la fuite de gaz.....	55
Figure.II.14a	multitude de points de corrosion.....	56
Figure.II.14b	Géométrie d'un défaut de corrosion dans un pipeline selon ASME B31.....	56
Figure.II.15	Réparation composite pour canalisations corrodées	57
Figure.II.16a	manchons de réparation en acier inoxydable.....	57
Figure.II.16b	Application du manchon en acier inoxydable.....	58
Figure.II.17	principe de remplacement par procédé pipe bursting.....	59
Figure.II.18	principe d'introduction d'un pipe en PE dans la conduite usée.....	60
Figure.II.19	Inclusion à l'origine d'une fissure.....	61
Figure.II.20	Eraflure sur paroi externe d'un tube PEHD.....	61
Figure.II.21	Rupture longitudinale d'un tube en PEHD.....	62
Figure.II.22a	variation des performances du PEHD en fonction du temps.....	62

Figure.II.22b	comparaison des caractéristiques du PE80 et du PE100.....	63
Figure.III.1	Motif de répétition du Polyéthylène.....	65
Figure.III.2	Différentes échelles d'organisation d'un polymère semi-cristallin : (a) conformation de chaîne, (b) lamelles cristallines, (c) sphérolites.....	67
Figure.III.3	Schématisation de la structure d'un sphérolites et grossissement montrant l'amorphe inter lamellaire en différentes positions dans le sphérolites.....	68
Figure.III.4	relation entre le taux de cristallinité et la masse volumique et la microstructure	68
Figure.III.5	variation de la résistance d'un polymère en fonction de son degré de cristallinité	69
Figure.III.6	Courbe contrainte-déformation d'un polymère semi-cristallin en traction uniaxiale.....	71
Figure.III.7	courbe charge-taux de déplacement du PEHD entaillé.....	72
Figure.III.8	schéma de principe du meulage.....	73
Figure.III.9	Facteur de concentration de contrainte en fonction du rayon d'entaille.....	74
Figure.III.10	Contour arbitraire autour du front de la fissure.....	75
Figure.III.11	interprétation énergétique de l'intégrale J.....	76
Figure.III.12	Variations locales de géométrie et concentration des contraintes.....	77
Figure.III.13	Elément de volume au voisinage d'un front de fissure rectiligne.....	78
Figure.III.14	Correction élasto-plastique de la répartition des contraintes.....	79
Figure.III.15	Répartition des contraintes en fond d'entaille.....	80
Figure.III.16	schéma d'une distribution de contraintes.....	81
Figure.III.17	Effet de la concentration de contrainte dans une entaille symétrique.....	83
Figure.IV.1	découpe de parallélépipèdes utilisés pour l'usinage des éprouvettes.....	85
Figure.IV.2	découpage en deux du prisme.....	86
Figure.IV.3	fraiseuse verticale.....	86
Figure.IV.4	dimensions des éprouvettes sans entaille de l'essai de traction réalisé.....	87
Figure.IV.5	Réalisation des rayons de courbure.....	88
Figure.IV.6	forme générale des éprouvettes de traction.....	89
Figure.IV.7	Machine de traction et de compression.....	90
Figure.IV.8	Courbe charge-Déplacement de l'éprouvette sans entaille.....	91
Figure.IV.9	courbe contrainte-déformation pour l'éprouvette sans entaille.....	92
Figure.IV.10	Courbes charge-déplacement pour a = 5mm et à différents rayons.....	92
Figure.IV.11	courbes charge-déplacement pour a = 10mm et à différents rayons.....	93
Figure.IV.12	courbes charge-déplacement pour a = 15mm et à différents rayons.....	94
Figure.IV.13	courbes charge-déplacement pour a = 20mm et à différents rayons.....	94
Figure.IV.14	courbes charge-déplacement pour a = 25mm et à différents rayons.....	95
Figure.IV.15a	estimation du facteur de concentration de contrainte méthode d'Inglis.....	98
Figure.IV.15b	estimation du facteur de concentration de contrainte méthode de Creager et Paris.....	98
Figure.IV.16	courbe charge déplacement normalisée de l'éprouvette sans entaille.....	99
Figure.IV.17	variation de la charge maximale en fonction du rapport profondeur d'entaille-largeur d'éprouvette.....	100
Figure.V.1	chargement et maillage de l'éprouvette de simulation.....	103
Figure.V.2	Condition aux limites de la simulation.....	105
Figure.V.3	Contrainte de Von Mises en fonction de la déformation axiale.....	106
Figure.V.4	Courbe charge déplacement du matériau sain.....	107
Figure.V.5	Courbes comportement du PEHD aux entailles.....	107
Figure.V.6	Variation du facteur de concentration de contrainte en fonction de R.....	110
Figure.V.7	variation de la charge maximale en fonction de a / W.....	111

Liste des tableaux

Tableau.II.1	classification des défauts et les méthodes de réparation effectuées.....	51
Tableau.III.1	Evolution des principales propriétés de PEHD en fonction des paramètres structuraux.....	70
Tableau.III.2	Différents modèles décrivant la répartition des contraintes normales au plan d'entaille	81
Tableau.III.3	modèles des contraintes élastoplastiques en fond d'entaille.....	82
Tableau.IV.1	dimensions des éprouvettes.....	89
Tableau.IV.2	valeurs de F_{\max} et W_r	95
Tableau.IV.3	éléments d'optimisation	100
Tableau.V.1.	Evolution de F_p avec les dimensions de l'entaille.....	108
Tableau.V.2	éléments de calcul du facteur de concentration de contrainte K_t	109
Tableau V.3	Valeurs optimales de la réparation des plaques de PEHD entaillées par meulage.....	111

**TABLE
DES
MATIERES**

Chapitre 0

1. Problématique industrielle	17
2. Méthodologie	17
3. Motivations	18
4. Objectifs	19

Chapitre I

1.Introduction	22
2.la réparation des structures métalliques	22
2.1.la réparation par soudage	22
2.1.a. Définitions	23
2.1.b.Les procédés de soudage	23
2.1.b.1.Soudage à l'arc avec électrode enrobée (n° 111 de la norme)	23
2.1.b.2. Les fonctions chimiques et métallurgiques	24
2.1.b.3.Les fonctions physiques	24
2.1.c. Les notions de métallurgie du soudage	25
2.1.d. Les défauts métallurgiques au soudage	27
2.1.d.1. Fissuration à chaud	27
2.1.d.2.Fissuration à froid	28
2.1.e.L'effet des défauts de soudures	29
2.2. La réparation par assemblages boulonnés	33
2.3. La réparation par rivetage	33
2.4.Réparation par patch	34
2.4.1.Le phénomène de transfert d'effort substrat/patch par cisaillement de la colle	35
2.4.2.différentes formes des patches	36
2.5.Le pontage de fissure par patch composite	37
2.6. Pourquoi un patch composite plutôt qu'un patch riveté ou boulonné ?	39
3 Les structure en béton	39
3.1.La réparation des fissures par injection	40
3.2.La réparation des fissures par calfeutrage	40
3.3.La réparation des fissures par pontage et protection localisée	41
4. Les matériaux plastiques	41

Chapitre II

1. Définition d'un pipeline	45
2. Endommagement des tubes de canalisation	45
3. quelques facteurs qui contribuent à la détérioration des conduites de canalisation	46
4. défaillances structurales des conduites de transport	46
5. Différentes méthodes de réparations	49
5.1. La réparation par soudure d'une demi-coquille	52
5.2. La réparation par l'époxyde + demi-coquille	52
5.3 La réparation par ressort d'horloge	53
5.4. La réparation par soudure de recouvrement	53
5.5. Réparation par meulage	54
5.6. Méthodes des industriels	54
5.6.1. Réparation par colmatage ou renforcement local	54
5.6.2. Techniques TRENCHLESS (réparation interne sans excavation)	58
6. Les tubes en polyéthylène haute densité (PEHD)	60
6.1. La réhabilitation des performances des tubes PEHD endommagés	62

Chapitre III	
1. Présentation du chapitre	65
2. Le polyéthylène	65
2.1. Synthèses et caractéristiques structurales du PE	65
2.1.1. Polymérisation de type Ziegler-Natta	66
2.1.2. Polymérisation de type métallocène	66
2.2. Structures cristallines et morphologies du PE	66
2.3. Propriétés mécaniques	69
3. Comportement plastique du PEHD	71
3.1. Epreuve sans entaille	71
3.2. Epreuve avec entaille (SENT)	72
4. La réparation des fissures par la modification géométrique	73
4.1. Technique du meulage	73
5. Rappels des concepts de la mécanique de la rupture	74
5.1. Concept de l'intégrale J	75
5.1.1. Expression du paramètre J	76
5.2. Répartition des contraintes à la pointe d'une fissure	77
5.3. Répartition des contraintes en fond d'entaille	79
5.3.1. Distribution des contraintes élastiques et élasto-plastique en fond d'entaille	80
5.4. Concentrations de contrainte	83
Chapitre IV	
1. Introduction	85
2. Réalisation des éprouvettes de traction	85
3. Essai de traction	90
3.1. Machine d'essais de traction	90
3.2. Exécution des essais de compression et de traction	90
4. Résultats des essais	91
4.1. Analyse et discussion des résultats expérimentaux	96
1) Méthode analytique	
a) Estimations de K_t par la méthode d'Inglis	96
b) Estimation de K_t par la méthode de Creager & Paris	97
4.2. Optimisation de la réparation	99
Chapitre V	
1. Introduction	103
2. Problème mécanique	103
2.1. description du problème	103
3. Résultats de la simulation	105
4. analyse des résultats	108
5. Comparaison des valeurs optimales	111
Conclusion générale	113
Perspective	116
Références bibliographiques	118
Annexe	123

INTRODUCTION GENERALE

0.1. Problématique industrielle

Les pipelines sont devenus ces 50 dernières années le moyen d'acheminement le moins coûteux et le plus sûr pour de grandes quantités d'énergies et sur des longues distances (plusieurs centaines voire plusieurs milliers de kilomètres).

“Le temps c'est l'argent” : obéissant à cette logique les professionnels des pipelines ont élaborés depuis les années 1970 des pipes en polyéthylène au multiples avantages :

- Facilité de fabrication ;
- Facilité d'installation ;
- Chimiquement neutre...etc.

Il faut bien noter que la majorité des ruptures des pipelines sont causées principalement par des agressions externes. Ces dernières se résument à des éraflures, écorchures et les rayures

0.1. Méthodologie

Plusieurs méthodes sont proposées et appliquées pour réhabiliter une canalisation défectueuse :

- 1 Réparation par soudure de recouvrement ;
- 2 Soudure ou boulonnage d'un manchon sur le segment défectueux ;
- 3 Meulage de la partie défectueuse et application d'une soudure de recouvrement [18].

Mais aucune ne traite de la réparation des tubes en polyéthylène haute densité (PEHD), c'est pour quoi dans notre étude nous allons chercher à savoir si les tubes en PEHD sont réparables par la méthode de meulage. On utilise des éprouvettes rectangulaires pour voir le comportement du matériau vis-à-vis du meulage sous chargement en traction uniaxiale.

Il existe dans la littérature des méthodes qui analysent la nocivité des défauts précités. Elles sont généralement basées sur l'analyse limite, la mécanique de rupture et la mécanique de rupture d'entaille. Selon le type du défaut, on choisit l'outil

adapté. Par exemple, les fissures sont traitées soit par la mécanique de rupture soit par l'analyse limite, les éraflures sont traitées par la mécanique de rupture d'entaille. Ces outils d'évaluation de la nocivité d'un défaut seront détaillés dans le chapitre. III L'étude réalisée dans ce mémoire est dédiée totalement aux entailles et leurs réparation par meulage, utilisant certains outils des méthodes d'analyse des défaut comme le facteur de concentration de contraintes .

Pour les plaques étudiées expérimentalement nous avons proposé un modèle numérique sous le code de calcul Comsol 3.5, dans lequel nous avons introduit la courbe d'écroutissage du PEHD.

0.2. Motivations

Généralement, 90% des ruptures dans les tuyaux PEHD sous pression sont dues à des concentrations de contraintes au voisinage d'un défaut [14 ; 18].

Ces défauts se regroupent en trois catégories: les inclusions, les fissures et les éraflures, alors que les fabricants de ces produits affirment que les tubes PEHD en une résistance à la propagation des fissures lentes pouvant atteindre 100 ans [20 ; 28]. Le souci qui préoccupe les exploitants des réseaux de canalisations est d'assurer la maintenance de ces réseaux pour préserver la sécurité des populations ainsi que l'impact que peut avoir une défaillance majeure sur l'aspect environnemental, notamment dans le cas de gaz inflammables ou explosifs [14].

En outre il ne faut pas oublier l'aspect économique et financier, car des pertes financières sont considérables en termes de remplacement de conduites, de travaux publics et de pertes d'exploitation. La prévention des ruptures est donc une nécessité et est réalisée par inspection et réparation des défauts dès leur début.

Au Laboratoire de Mécanique, Biomécanique Polymères et Structure (LABPS), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz, Université Paul Verlaine de Metz, il a été étudié jusqu'à présent, l'influence du meulage sur le fonctionnement des tuyaux métalliques sous pression [18].

Ce travail a été proposé pour servir de base pour une étude ultérieure qui se portera sur la réparation des tubes en PEHD sous pression.

0.3. Objectifs

Ce travail a pour objectif de proposer une étude complète, à la fois expérimentale et numérique, sur le comportement des plaques normalisées de PEHD sous chargement statique (traction uniaxiale) contenant des entailles réparées avec différents rayons. Il est basé sur l'analyse de la distribution de contrainte en fond d'entaille. Comme nous estimons en utilisant l'analyse limite des fissures les valeurs du rapport $\frac{a}{W}$ pour lesquelles la réparation est optimale

Ce manuscrit débute par une introduction générale où nous avons situé le problème du point de vue industriel, et la problématique liée à la maintenance et au changement d'une canalisation endommagée. Les motivations et les objectifs de cette étude sont intégrés dans cette introduction. Et cinq autres chapitres répartis comme suit :

Chapitre I : est consacré à l'état de l'art et à la présentation générale du domaine des fissures. Les principaux défauts sur différents types de matériaux et les différentes méthodes de réparation des fissures.

Chapitre II : dans ce chapitre on a cherché à détailler, sur les modes d'endommagements des pipelines et les différentes techniques permettant leur réhabilitation

Chapitre III : est dédié à la présentation du matériau étudié, ses caractéristiques physiques et son comportement mécanique, ajoutez à cela, on a défini la réparation par modification géométrique et rappelé quelques concepts de la mécanique de rupture utilisés dans le cadre de notre étude .

Chapitre IV et V : sont consacrés à l'étude de la réparation par meulage le quatrième chapitre c'est l'optimisation de la réparation par la méthode expérimentale et le

cinquième chapitre est une étude numérique moyennant la méthode des éléments finis sous le code de calcul COMSOL 3.5

On termine notre mémoire par une conclusion générale et perspective.

CHAPITRE I
REPARATION DES
FISSURES

I.1.Introduction

L'apparition des fissures est un phénomène auquel sont confrontées toutes les constructions au cours de leurs vies en service dans le domaine pour lequel elles ont été mises en œuvre, et cela qu'elle soit le type de matériau utilisé. Pour des raisons économiques évidentes la perspective de les réparer est très souhaitable, afin d'éviter des pertes financières par le déclin de la qualité du service. Dans ce chapitre nous présentons un recueil des différentes méthodes de rénovation et de réparation des structures.

I.2. la réparation des structures métalliques

L'ensemble des techniques et méthodes de construction sont utilisées en réparation, soit en atelier en préparation d'éléments ou in situ.

Tout projet de réparation doit faire l'objet d'une étude basée sur la connaissance du matériau métallique employé et de son comportement métallurgique afin d'apprécier son comportement au soudage, d'adapter les paramètres de soudage et, s'il y a lieu, d'exclure la réparation par soudage au profit de techniques de réparation par assemblage telles que le rivetage ou le boulonnage [1].

I.2.1. la réparation par soudage

La soudure est en théorie le moyen le plus souple et le plus efficace pour réparer ou renforcer un ouvrage. Le soudage relève de la métallurgie. La soudabilité des aciers a évolué considérablement. Depuis 1950 environ, les sidérurgistes ont basé le développement des aciers en privilégiant leur soudabilité [1].

I.2.1.a. Définitions

Le soudage est l'opération d'assemblage qui assure la continuité métallique de deux pièces par phénomène de fusion local [1 ; 2].

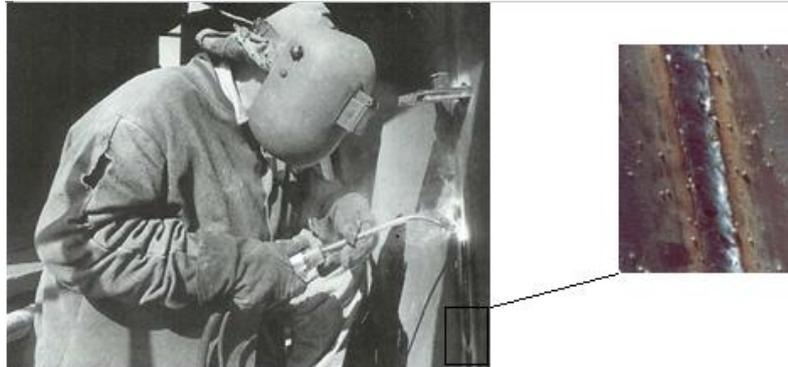


Figure I.1 soudage à l'arc [1]

I.2.1.b. Les procédés de soudage

Les procédés de soudage des métaux sont nombreux et basés sur des techniques très diverses.

Nous indiquons ci-après le procédé de soudage généralement utilisé sur site dans le cadre des réparations des ouvrages, en mentionnant pour son numéro d'identification suivant la norme **NF EN 24063** : cette norme fournit un classement systématique des procédés de soudage des métaux, avec pour chacun une désignation normalisée et un numéro d'identification [1].

I.2.1.b.1. Soudage à l'arc avec électrode enrobée (n° 111 de la norme)

C'est la première solution mise au point pour le soudage à l'arc, utilisée dès 1907. Il s'agit d'un procédé manuel : le soudeur tient et guide à la main le porte électrode (*figure I.1-I.2*).

Les électrodes sont constituées d'une âme métallique et d'un enrobage. Le diamètre, enrobage compris, est de l'ordre de 6 mm. L'âme conduit le courant électrique et fond en fournissant le métal d'apport.

L'enrobage a une composition complexe (produits minéraux, métalliques et organiques), car il doit assurer plusieurs fonctions :

I.2.1.b.2. Les fonctions chimiques et métallurgiques

- produire des gaz (par exemple, gaz carbonique par décomposition de carbonates) pour protéger le bain de fusion des effets de l'oxygène et de l'azote atmosphériques,
- épurer le bain de fusion par apport d'éléments désoxydants et dénitruants,
- fournir au métal déposé, si nécessaire, des éléments d'alliage pour améliorer ses caractéristiques mécaniques ;

I.2.1.b.3. Les fonctions physiques

- former par fusion un laitier liquide qui se solidifie à la surface du métal déposé, lui apportant une protection physico-chimique, en particulier le protégeant d'un refroidissement trop rapide qui entraînerait un risque de fragilisation par trempe,
- favoriser l'amorçage et la stabilité de l'arc,
- canaliser les gouttelettes de métal fondu, grâce au jet de gaz incandescent produit, ce qui est utile en particulier lorsqu'il faut souder en position verticale, au plafond.

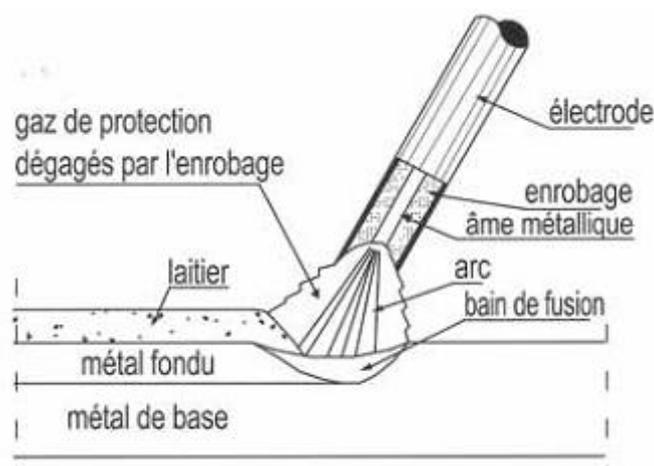


Figure.I.2 Principe du soudage à l'arc avec électrode enrobée [1]

I.2.1.c. Les notions de métallurgie du soudage

Au cours de l'opération de soudage, une grande quantité de chaleur est apportée localement à la pièce soudée *figure.I.3* ; Cet apport de chaleur engendre [1] :

- un chauffage très rapide jusqu'à une température comprise entre la température ambiante et la température de fusion du métal, suivant la distance entre la zone fondue et le point considéré dans la pièce soudée ;
- un refroidissement qui succède immédiatement au chauffage et dont la cinétique dépend essentiellement, comme nous le verrons, de l'ensemble des conditions opératoires (et notamment des paramètres de soudage, de la géométrie du joint, du procédé de soudage et de son rendement thermique ...).

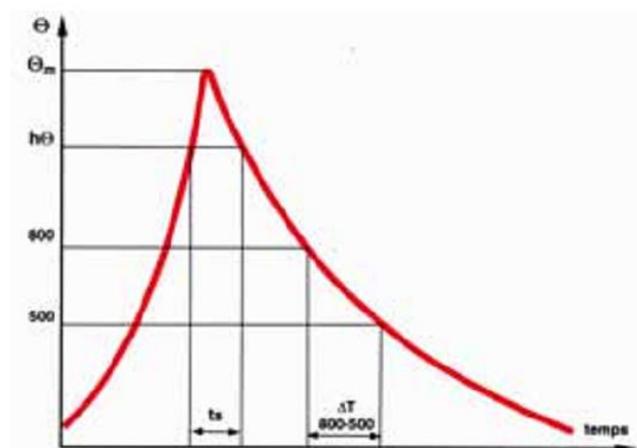


Figure.I.3 Cycle thermique de soudage [1]

Un tel cycle thermique engendre inévitablement des changements dans la structure du métal

La figure ci-après reproduit un exemple des modifications structurales se produisant au voisinage d'une soudure. Il est possible de distinguer (*figure I.4*) :

- la région du métal de base où la température maximale atteinte reste inférieure à environ 600°C, dans laquelle, à l'examen métallographique, on ne détecte pas de modification structurale visible ;

- une zone où la température maximale atteinte est comprise entre 600°C et 723°C. Certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu dans cette zone, précipitation et coalescence en présence d'éléments dispersoïdes, légère globulisation de la perlite ;
- une zone de température maximale comprise entre 723°C et 1147°C. Le franchissement du point de 723°C conduit à des modifications structurales importantes et l'on pénètre alors dans la partie visible de la zone affectée par la chaleur ; sur la figure, on voit que l'austénitisation partielle du métal conduit à une structure à grains très fins ;
- la zone adjacente au cordon de soudure, où la température maximale atteinte est très élevée (supérieure à 1 200°C). Dans cette région, le grossissement très important du grain austénitique confère au métal une forte trempabilité qui conduit, après refroidissement, à des structures aciculaires très grossières, voire à des structures de trempe (martensite) pour les refroidissements les plus rapides.

MF : métal fondu

Z L : zone de liaison

ZAT : zone affectée thermiquement

MB : métal de base

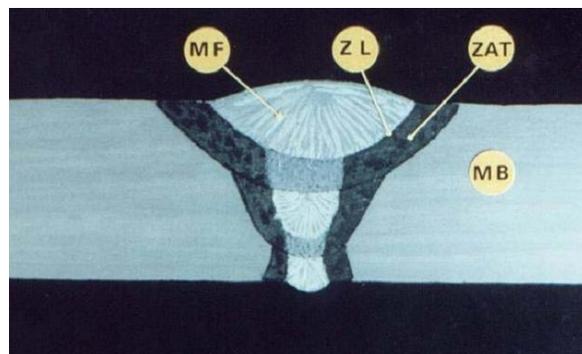


Figure.I.4 Structures et transformations métallurgiques du métal [1 ; 2]

Cette dernière région, qu'il est convenu d'appeler zone à gros grains, est la source de la plupart des problèmes soulevés par le soudage des aciers. C'est là en effet que risquent de prendre naissance et de progresser les fissures à froid et c'est également dans cette région que les propriétés mécaniques du métal (notamment en ce qui concerne la résistance à la rupture fragile) sont le plus modifiées.

I.2.1.d. Les défauts métallurgiques au soudage [1]

I.2.1.d.1. Fissuration à chaud

La fissuration à chaud est causée par l'action des contraintes de retrait lorsque le métal est encore très chaud après le soudage et que sa ductilité est insuffisante. Elle apparaît donc sans délai et se manifeste sous forme de fissures longitudinales, localisées le plus souvent dans la partie centrale de la zone de métal fondu voir la (figure I.5).

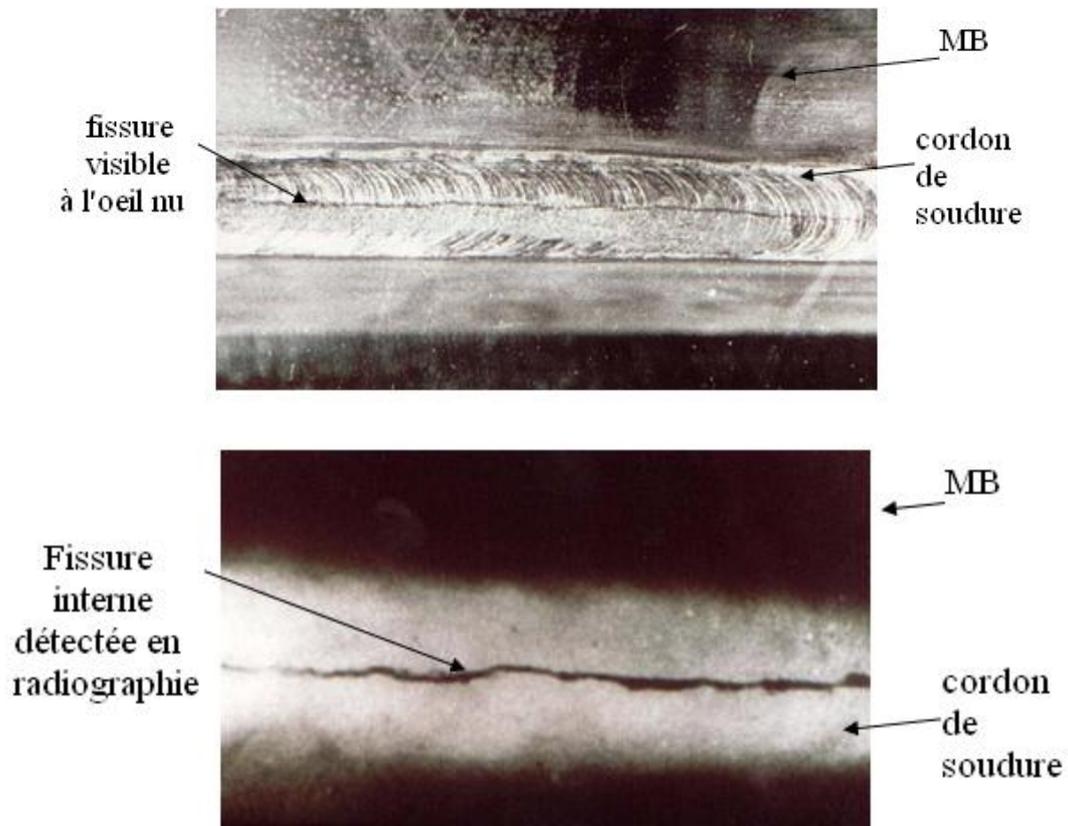
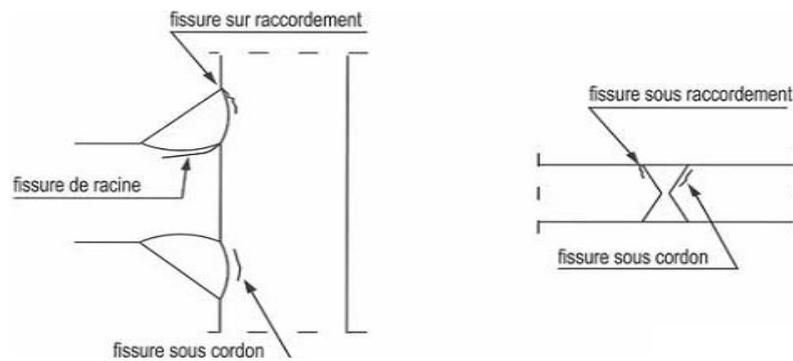


Figure.I.5 fissuration à chaud [2]

I.2.1.d.2.Fissuration à froid

La fissuration à froid, ou fissuration différée, est l'incident le plus redouté parmi ceux liés à un défaut de soudabilité. Elle se produit sous les cordons de soudure, dans les zones affectées thermiquement, (*figure.I.6*).



Fissure à froid détectée en macrographie

Figure.I.6 fissuration à froid [1 ; 2]

Son mécanisme résulte de l'action de l'hydrogène sur une microstructure métallographique fragile soumise à des contraintes. Il y a donc trois sortes de facteurs, liés respectivement à l'acier, à l'état de contraintes des pièces et aux conditions de soudage [1] :

- Acier de base (ou métal fondu) ayant un carbone équivalent élevé et contenant des impuretés. Il peut en résulter une structure métallographique fragile de type martensitique après soudage, si le refroidissement est trop rapide.
- Contraintes de traction élevées dans la zone affectée thermiquement par le soudage.

- Présence d'hydrogène dans le cordon de soudure. Cet hydrogène provient de la décomposition, dans l'arc électrique, de l'humidité contenue dans les enrobages et dans les flux (eau résiduelle de fabrication, reprise d'humidité après l'ouverture du paquet...). Il provient aussi, dans une moindre mesure, de l'humidité contenue dans l'atmosphère de soudage et de celle éventuellement présente sur les pièces à souder.

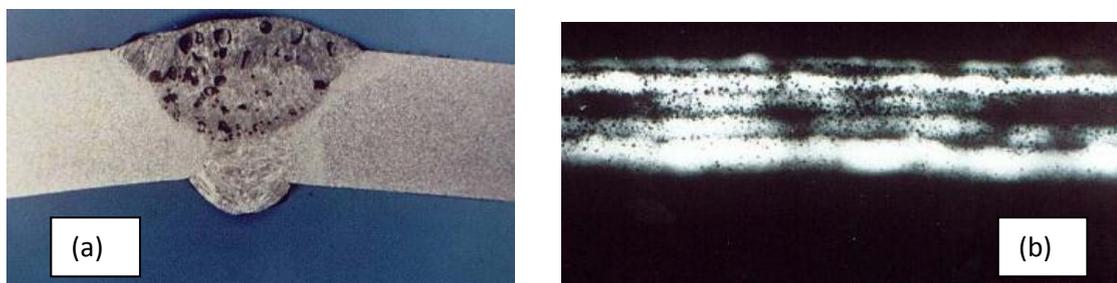
I.2.1.e.L'effet des défauts de soudures [2]

Les défauts des soudures peuvent être nocifs de différentes façons. Ils peuvent :

- affaiblir la résistance statique de l'assemblage;
- initier une fissure de fatigue;
- provoquer une rupture fragile, si d'autres facteurs défavorables sont réunis.

La nocivité des défauts dépend de leur taille et de leur forme géométrique. Il est possible de classer les défauts en cinq groupes suivant la norme **NF EN ISO 5817**
Classement des défauts dans les soudures par fusion des métaux :

- 1. Fissures** : Elles peuvent être dues à la fissuration à froid ou à chaud. Ce sont les défauts les plus nocifs, voir (*figures I.5- I.6*).
- 2. Cavités** : Il s'agit notamment des soufflures dues à des inclusions gazeuses. Elles sont plus ou moins nocives en elles-mêmes ; elles peuvent aussi gêner la détection d'autres défauts, (*figure.I.7*).



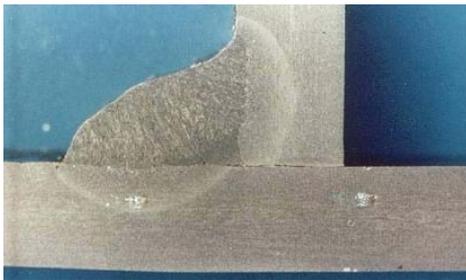
**Figure I-7: (a)Macrographie d'une soudure avec soufflures ;
(b) : Soufflures détectées par radiographie [2].**

- 3. Inclusions solides** : Elles peuvent être constituées de résidu de laitier ou de flux emprisonné dans la soudure. Elles ont les mêmes conséquences que les soufflures, (*figure.I.8*).



Figure.I.8 Inclusions de laitier décelées par radiographie [2]

- 4. Manques de fusion ou de pénétration** : Les manques de fusion sont un défaut de liaison entre le métal déposé et le métal de base, ou entre deux couches contigües de métal déposé. Les manques de fusion ou de pénétration sont dus à un mode opératoire inadapté, (*figure.I.9*). Comme ils peuvent avoir un effet d'entaille analogue à celui des fissures.



Manque de fusion et effondrement



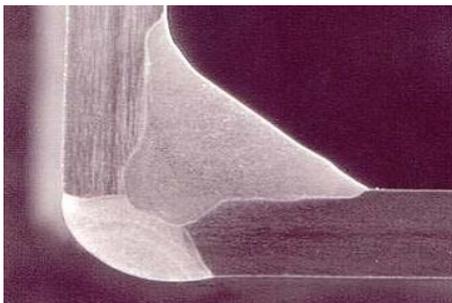
Manque de pénétration et collage entre passe



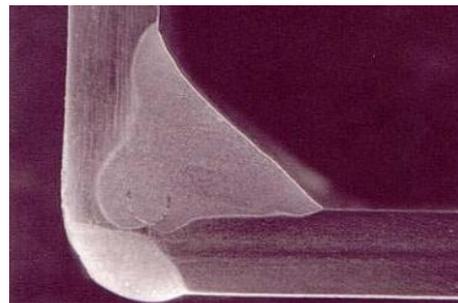
Manque de fusion en bord de chanfrein et sous cordon



Manque de pénétration et collage en bord de chanfrein



Macrographie d'une soudure pénétrée



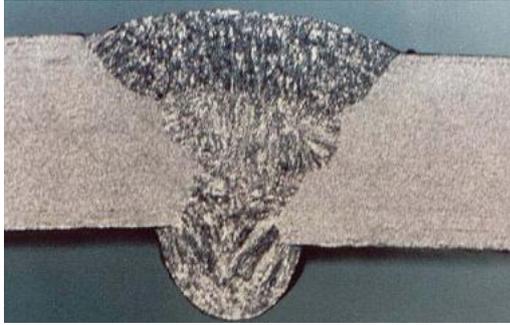
Manque de fusion de la soudure

Figure.I.9 Manques de fusion ou de pénétration [2]

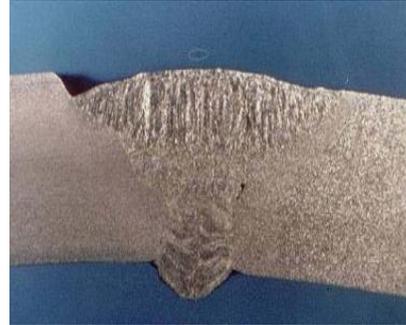
5. Défauts de forme : Ils peuvent concerner, soit la position des éléments l'un par rapport à l'autre (défaut d'alignement, défaut angulaire...), soit de la soudure elle-même (défaut de raccordement des soudures aux éléments, surépaisseur, manque d'épaisseur, effondrement, caniveau, dissymétrie d'une soudure d'angle, etc.). Les défauts de forme des soudures sont dus soit à un mode opératoire inadapté, soit, dans le cas des soudures d'angle, à une mauvaise tenue de l'électrode ou du pistolet par le soudeur, (*figure.I.10*).

Sur des matériaux anciens, ces défauts peuvent représenter plus de risques que sur les matériaux modernes de meilleure ténacité. En conséquence, le dessin des pièces devra

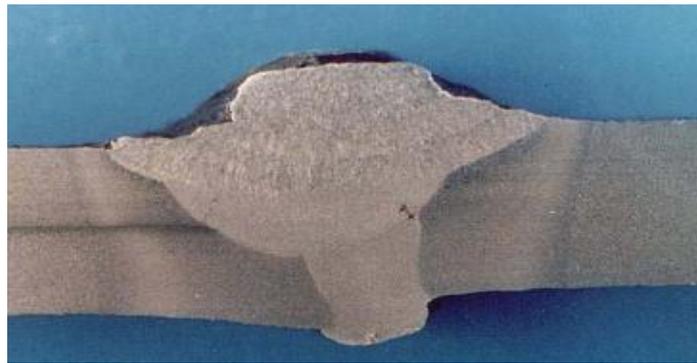
éviter *les effets des concentrations de contraintes*. De plus, il sera porté une attention particulière à l'élaboration et au suivi des **DMOS** (descriptif de mode opératoire de soudage) et **QMOS** (qualification de mode opératoire de soudage).



Effondrement et excès de pénétration



Caniveau



Défaut d'alignement

Figure.I.10 défauts de forme [2]

I.2.2. La réparation par assemblages boulonnés

La réparation des ouvrages par boulonnage ne comporte pas de véritables spécificités liées à la période de construction et des matériaux utilisés.

Des boulons à haute résistance ont été utilisés en France dès les années 1950 pour la réparation et le renforcement de ponts- rails rivés. Leur utilisation s'est étendue ensuite aux ouvrages neufs dans les années 1960. [11]

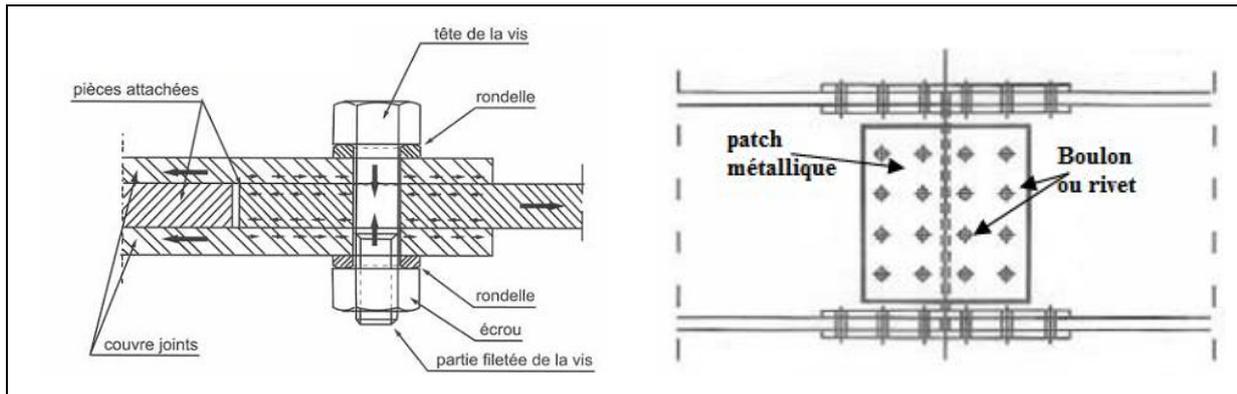


Figure.I.11 exemple de réparation par boulonnage [1]

I.2.3. La réparation par rivetage

Le rivetage a constitué le principal mode d'assemblage de pièces métalliques Jusqu'au développement de la soudure, qui, avec la technique du boulon à haute résistance, l'ont progressivement remplacé dans les années 1960[1]. Aujourd'hui, cette technique est réservée au domaine de la réparation des ouvrages métalliques anciens rivés.

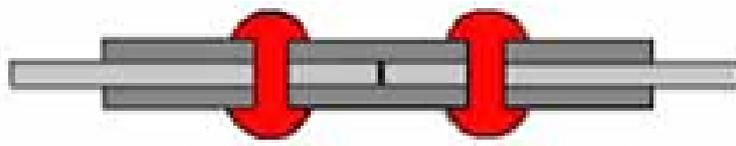


Figure.I.12 assemblage par rivetage [1]

Bien sur la réparation par rivetage et boulonnage présente le type de défaut que nous cherchons à éliminer à savoir *la concentration de contrainte* et développement de fissure autour du trou, (figure.I.13).

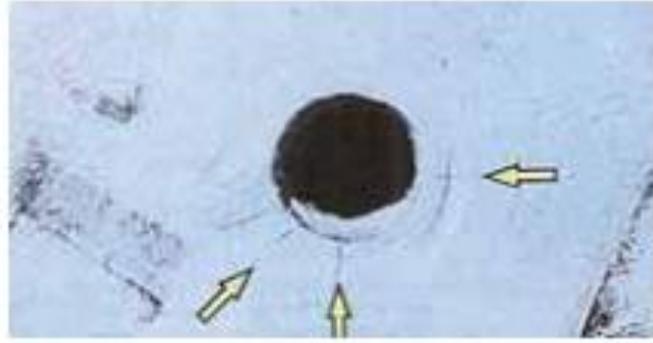


Figure.I.13 fissuration sur trou [1]

I.2.4.Réparation par patch

Des patches en matériaux composites sont classiquement utilisés pour la réparation des structures métalliques présentant des dommages de type fissures, Afin de prolonger la durée de vie de telles structures, il existe plusieurs alternatives qui dépendent du niveau de ces dommages [3]:

- si le niveau de ces criques n'est pas trop important, l'une des solutions souvent utilisée en maintenance est l'alésage de la pointe de fissure. Ceci a pour conséquence d'arrêter sa propagation ;
- si des fissures apparaissent dans des zones moins critiques, elles peuvent être pontées par des matériaux composites. On parle de réparation par patch.
- La réparation qui consiste à la mise en place de patches boulonnés ou rivetés a pour inconvénient l'apparition d'un champ singulier de contraintes qui apparaît dans les liaisons, (*figure.I.13*).

Afin d'éviter *les concentrations de contraintes*, une solution possible consiste alors à coller un patch composite.

I.2.4.1. Le phénomène de transfert d'effort substrat/patch par cisaillement de la colle

La colle est souvent le point faible dans une réparation. C'est sa rupture ou sa décohésion qui provoque le détachement du renfort composite (*figure.I.14*). [3]

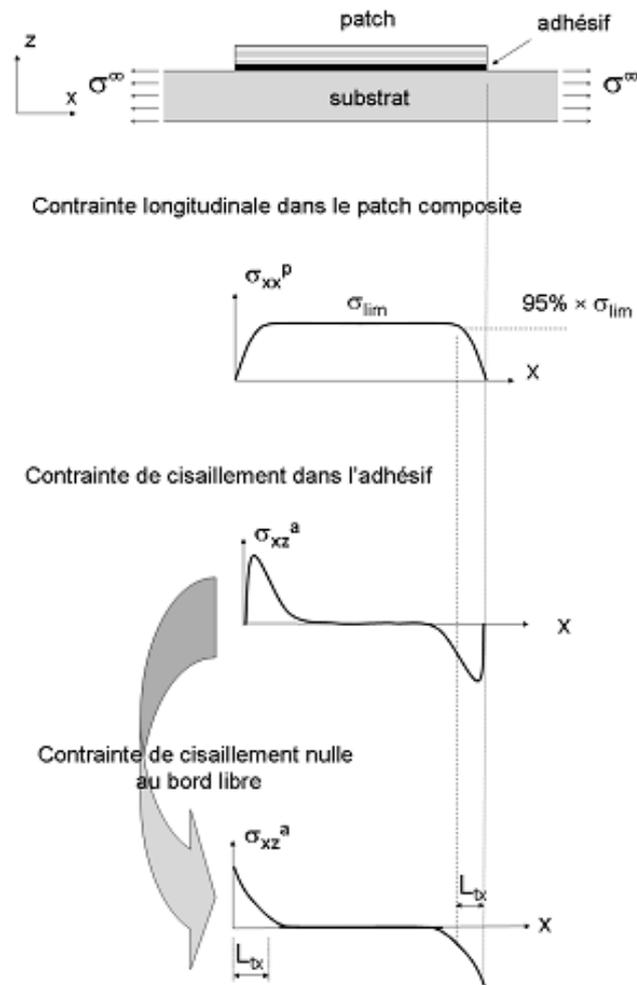
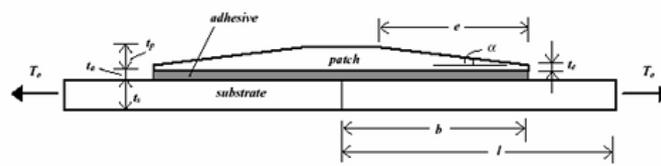


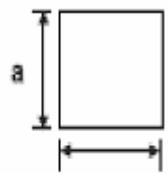
Figure.I.14 Modèle unidimensionnel d'une structure renforcée par un patch composite [3]

I.2.4.2. différentes formes des patches

Plusieurs études se sont penchées sur ce phénomène de décohésion des patches composites pour permettre une bonne longévité de la structure endommagée. En optimisant les caractéristiques de l'adhésif et la géométrie du patch composite en fonction des propriétés du matériau constituant la structure à réparer ; Partant d'hypothèse telle que la contrainte de cisaillement est maximale aux bords libres [3]. Comme l'illustrent-les (figures.I.15).

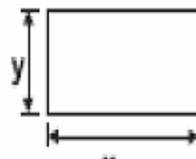


Patch composite avec une épaisseur dégressive



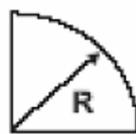
a

Patch carré

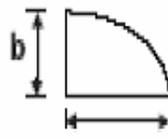


x

Patch rectangulaire

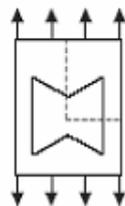
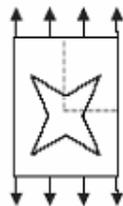


Patch circulaire



a

Patch elliptique



Patches en forme d'étoile

Figure.I.15 Diverses formes de patches composites [3]

I.2.5. Le pontage de fissure par patch composite

Des patches sont collés sur la zone endommagée afin de ponter des fissures existantes. Le but de cet exemple est d'étudier l'influence du patch composite sur la propagation de la fissure. [3]

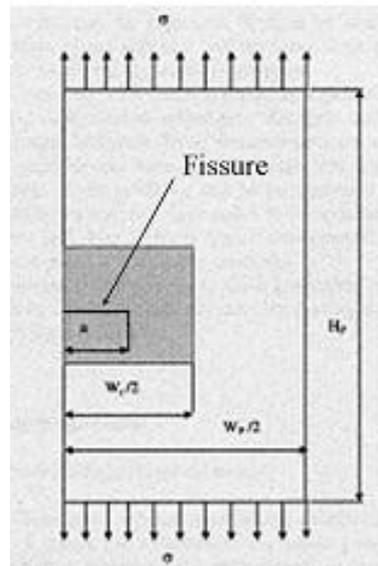


Figure.I.16 Structure fissurée et renforcée par un patch composite [3]

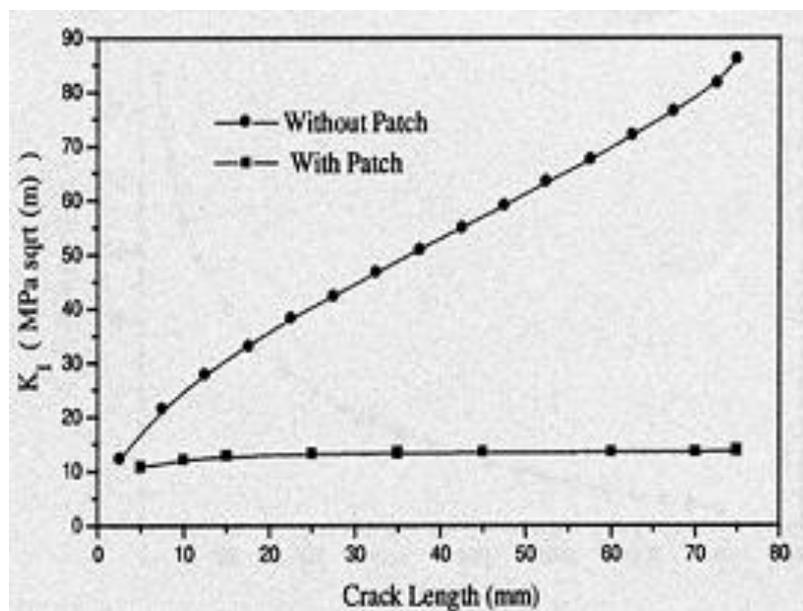


Figure.I.17 Evolution du facteur d'intensité K_I en fonction de la longueur de fissure [3]

Le patch composite a tendance à diminuer nettement K_1 par rapport à une structure non renforcée.

La réparation par patch composite est utilisée dans plusieurs domaines mais nous citerons ici que le domaine de l'aéronautique car c'est là où elle est le plus utilisée, (figures I.18- I.19) [3].

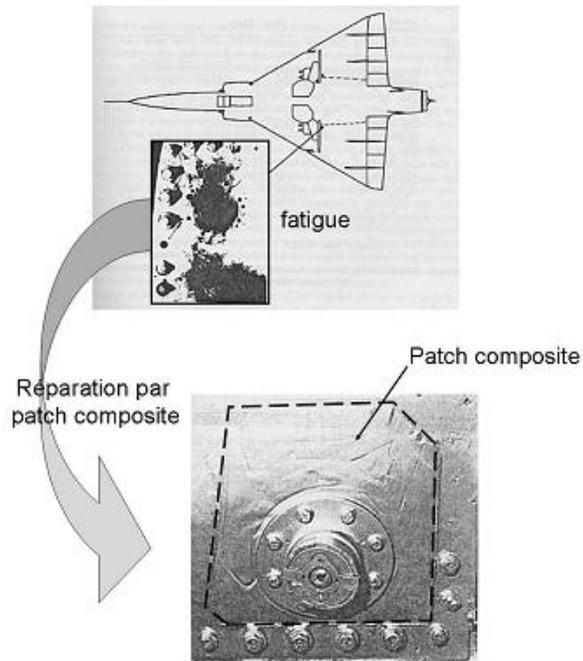


Figure.I.18 Exemple de réparation sur un avion Mirage [3]

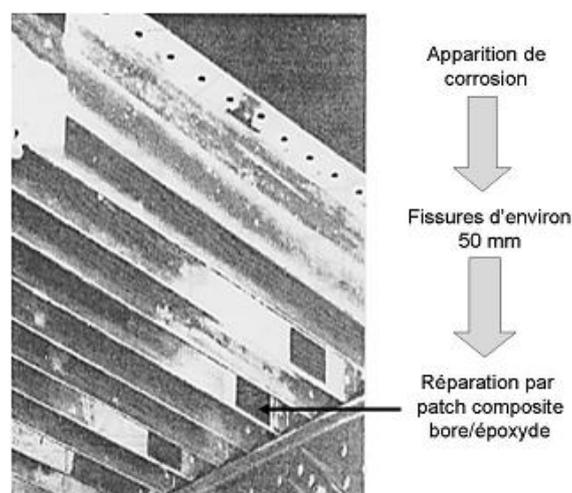


Figure.I.19 Exemple de réparation sur un avion Hercules [3]

I.2.6. Pourquoi un patch composite plutôt qu'un patch riveté ou boulonné ?

Pour répondre à cette question, examinons la (figure.I.20) qui illustre à gauche un patch riveté et à droite un patch collé [3].

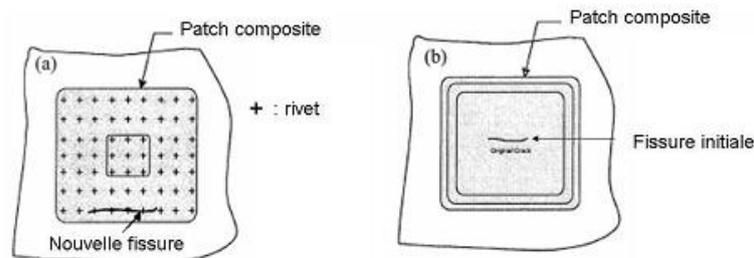


Figure.I.20 Exemples de patches riveté et collé [3]

Le verdict est sans appel .Le patch collé présente de nombreux avantages par rapport au patch riveté :

- Le patch collé n'entraîne pas de *concentrations de contraintes*, contrairement au patch riveté ;
- il est plus facile de contrôler les propagations de fissures avec un patch collé qu'avec un patch riveté ;
- il existe moins de risque de corrosion avec un patch collé ;
- *la propagation des fissures* est plus importante près des bords avec un patch riveté ;
- le renforcement créé est plus efficace avec un patch collé.
-

I.3 Les structure en béton

Le traitement d'une fissure ou d'un ensemble de fissures en fonction de leur origine, de leur importance, de leur accessibilité, de leur activité ou non (fissures actives ou mortes) consiste à la reconstitution de la continuité du matériau, l'étanchéité à l'air ou à l'eau sans ou sous pression, etc...

Parmi les techniques utilisées par les ingénieurs en génie civil pour traiter ces problèmes de fissure, on peut citer [4] :

- La réparation des fissures par injection

- La réparation des fissures par calfeutrage.
- La réparation des fissures par pontage et protection localisée.

I.3.1. La réparation des fissures par injection

Consiste à faire pénétrer dans des fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique et/ou une étanchéité. Il ne s'applique normalement qu'aux fissures injectables, c'est-à-dire dont l'ouverture est au moins comprise entre 0,1 et 0,2 mm [4].



Figure.I.21 réparation des fissures sous un pont [4]

I.3.2. La réparation des fissures par calfeutrage

Consiste à colmater sur une certaine profondeur les fissures par un produit souple, voire rigide pour rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou pour empêcher la pénétration de matières solides. Il s'applique aux fissures qui ne mettent pas en jeu la résistance de la structure. Il est bien adapté, par exemple, aux fissures des dallages industriels [4].



Calfeutrage de fissures à l'aide d'un mortier à base de liants hydrauliques



calfeutrage d'une fissure à l'aide d'un mastic à base de liants organiques

Figure.I.22 traitement des fissures par calfeutrage [4]

I.3.3. La réparation des fissures par pontage et protection localisée

Consiste à recouvrir en surface des fissures pour rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou pour empêcher la pénétration de matières solides (risque de blocage des mouvements des fissures) tout en les laissant libres leurs mouvements. Il doit permettre, si nécessaire, la mise en œuvre d'un revêtement de finition [4].

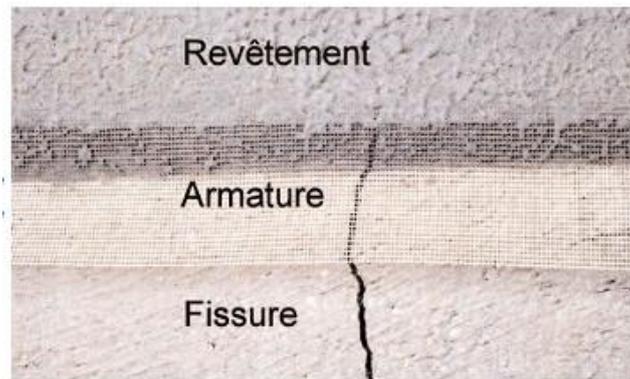


Figure I.23 pontage d'une fissure avec incorporation d'une armature [4]

I.4. Les matériaux plastiques

La réparation par patch composite à montré ses performance mais ce n'est pas pour autant que la recherche de nouvelles technique de réparation a été abandonnée.

Depuis longtemps, les scientifiques cherchent des pistes pour réaliser un rêve d'ingénieur, celui de faire disparaître sans réparation les rayures, les fissures, les criques, les coupures et autres déchirures que certains organismes vivants savent si bien faire.

Des solutions ont été imaginées, notamment dans le cas des matériaux durs, et sophistiquées. L'équipe de Ludwik Leibler explore une autre voie : celles des matériaux supramoléculaires. En 1987, une étude sur ces structures a valu le prix Nobel au Français Jean-Marie Lehn et aux Américains Donald J. Cram et Charles J. Pedersen. Une chimie complètement nouvelle était née, que Jean-Marie Lehn a proposé d'appeler *supramoléculaire*.

Alors que la chimie traditionnelle manipule les liaisons entre atomes, la chimie supramoléculaire tire profit des liaisons intermoléculaires, de nature physique et non chimique comme la liaison hydrogène qui lie entre elles les molécules d'eau. On peut ainsi construire des édifices de grande taille (à l'échelle nanométrique) dans lesquels

les molécules s'accrochent entre elles ou s'imbriquent les unes dans les autres. Avec les enzymes et les multiples récepteurs sur la membrane des cellules, la vie utilise la chimie supramoléculaire mais ces phénomènes sont peu présents dans le monde minéral. *« C'est une chimie qui n'est pas souvent utilisée dans l'univers, nous pouvons grâce à elle imaginer des structures inédites ; Si vous percez un joint d'étanchéité dans un mur, il va se réparer tout seul »* [Jean-Marie Lehn] [28]

Cette nouvelle chimie a depuis essaimé dans plusieurs domaines, et fait l'objet de plusieurs études comme celle d'A. Périchaud, W. Ballout, D. Donescu, C. Nistor et M.J-M. Abadie portant sur le Traitements de surface auto cicatrisants pour applications spatiales : cas des panneaux solaires

Il existe deux grands concepts de matériaux autoréparables [5].

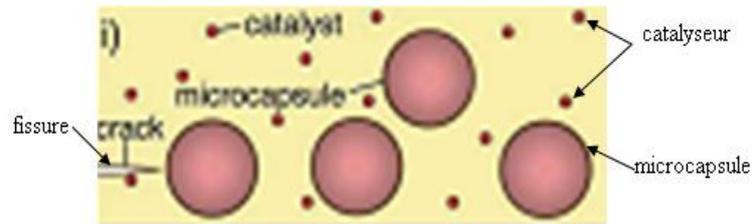
1. la fermeture de la fissure : ce sont les principes de la chimie Supramoléculaire qui sont mis en jeu. Le rapprochement des deux faces peut être réalisé par des matériaux à mémoire de forme (alliage métallique ou polymère)
2. le comblement de celle-ci : la fissure est remplie par un agent de réparation généralement de même nature que le revêtement qui comblera la fissure après avoir été polymérisé

Pour mettre en œuvre un matériau autoréparable utilisant un agent de réparation et qui à la capacité de satisfaire ces deux concepts il faut réunir les trois points cruciaux suivant :

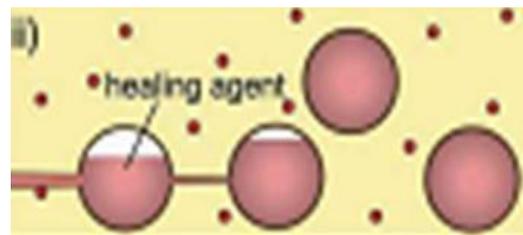
- a) le stockage de l'agent de réparation (microcapsules ou fibres creuses) ;
- b) le transport de cet agent à la fissure ;
- c) le déclenchement de l'action de réparation.

Ces trois points réunis la réaction de réparation est engendrée par le champ de contraintes au niveau de la fissure. Celui-ci provoque la rupture des microcapsules ou des fibres creuses. L'agent de réparation est alors transporté jusqu'à la fissure par les forces capillaires et polymérise sous l'effet du

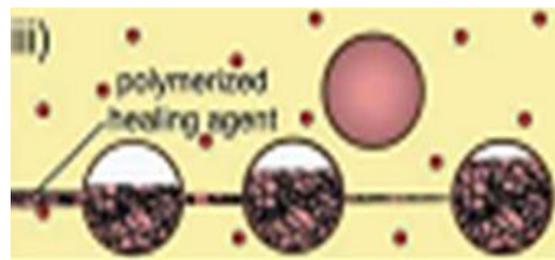
catalyseur généralement dispersé dans le matériau, bouchant ainsi la fissure (figure.I.24).



Apparition de la fissure sur le matériau



Rupture des microcapsules et libération de l'agent de réparation



Fermeture de la fissure par polymérisation de l'agent de réparation

Figure.I.24 Concept de l'auto-réparation [5]

Le recours à des composants fonctionnels, stockés dans des matériaux composites pour rétablir les propriétés physiques après endommagement, a longtemps été recommandé par plusieurs chercheurs. Un grand nombre de laboratoires de différentes universités dans le monde (universités de l'Illinois, de Bristol et de Delaware...) ont commencé les recherches dans ce secteur, il y a une dizaine d'années à peine.

CHAPITRE II
ENDOMMAGEMENT
ET
REPARATION
DES
TUBES

II.1. Définition d'un pipeline

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des biens, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de : tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement, Les tuyaux en fonte ainsi que ceux en fonte ductile, on utilise aussi, le polyvinyle de chlorure (PVC), l'amiante-ciment et les tuyaux sous pression en béton. Et sans oublier la nouvelle tendance des tubes, ceux en polyéthylène haute densité (PEHD), qui représentent le moyen de transport de l'avenir pour tous produits susceptibles d'être acheminés via un réseau de tubes. [3 ; 12]

II.2. Endommagement des tubes de canalisation

Chacun de ces types de tuyaux, comme toute chose sur terre, après une certaine durée de vie en service, finissent par subir un dysfonctionnement qui conduit à leur réparation ou à leur remplacement par d'autres neufs.

Puisque la majorité des réseaux de canalisation sont constitués d'éléments métalliques, dans certains environnements la corrosion est le facteur principal causant leur détérioration.

Un tuyau en polyvinyle de chlorure peut se détériorer à la suite d'une attaque chimique par certains solvants ou en raison d'une dégradation mécanique résultant de mauvaises méthodes de pose. Il y aura détérioration de tuyaux en amiante-ciment et de revêtements en mortier de ciment en présence d'eau agressive qui lessive le ciment.

La détérioration des tuyaux sous pression en béton survient habituellement lorsqu'il y a corrosion des fils pour béton précontraint, ce qui peut causer la rupture du tuyau. Les autres problèmes liés aux tuyaux en béton sous pression sont la détérioration du béton et la corrosion de l'âme en acier [6].

II.3. quelques facteurs qui contribuent à la détérioration des conduites de canalisation [6]

- Matériau du tuyau : La nature de la défaillance varie selon le matériau du tuyau.
- Âge du tuyau : Les effets de la dégradation du tuyau deviennent plus visibles avec l'âge.
- Diamètre du tuyau : Les tuyaux de petit diamètre sont plus sensibles à une défaillance au niveau du cylindre.
- Fabrication des tuyaux : Les tuyaux peuvent être plus vulnérables à la défaillance en raison d'imperfections dans les parois résultant d'erreurs de fabrication.

II.4. défaillances structurales des conduites de transport [6]

Les conduites de distribution des fluides se rompent habituellement lorsque l'étendue de la dégradation est suffisante pour empêcher la conduite de résister aux contraintes qu'elle subit (*figure.II.1a*) et (*figure.II.1b*)

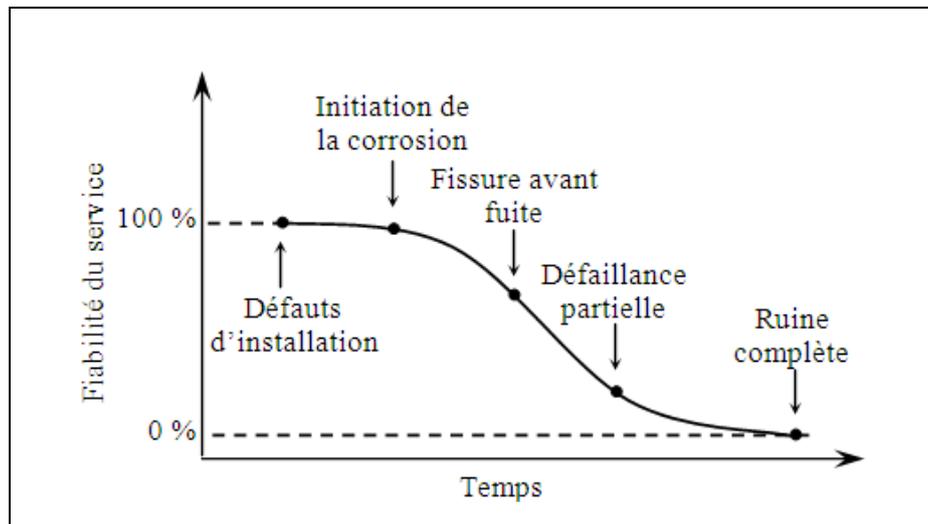


Figure .II.1a Développement de défaillance d'un pipeline [7]



Figure.II.1b Eclatements avec rupture franche de la canalisation [8]

La (figure.II.2), illustre les types de ruptures les plus courantes dans le cas des conduites de distribution des fluides ainsi que les efforts qui s'exercent sur le tuyau et causent la rupture.

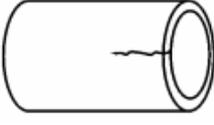
Type de fissure	Efforts exerçant
 Fissure circulaire	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Contrainte de flexion due au gel ➤ Contrainte longitudinale à proximité des robinets et des raccords
 Rupture longitudinale	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Contrainte périphérique due à la pression interne de l'eau ➤ Contrainte annulaire due à la surcharge exercée par la couverture du sol ➤ Contrainte périphérique due à de l'eau gelée ➤ Contrainte annulaire due à la surcharge exercée par la circulation
 Division de l'emboîtement	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Dilatation du matériau du joint Par exemple : plomb
 Cisaillement de l'emboîtement	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Enfoncement excessif du cordon dans l'emboîtement ➤ Contrainte de flexion
 Fissure spirale (rupture en colimaçon)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Combinaison entre contrainte de flexion et contrainte périphérique due à la pression de l'eau
 Eclatement	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Contrainte périphérique due à la pression interne de l'eau ➤ Corrosion des fils de précontrainte en acier dans les tuyaux sous pression en béton
 Trou traversant	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Corrosion par piqûre ➤ Imperfection dans le moulage

Figure.II.2 Type de fissure et leurs causes [6]

La (figure.II.3) indique que des incidents plus sérieux ont été provoqués par des dommages d'excavation que par toute autre cause simple.

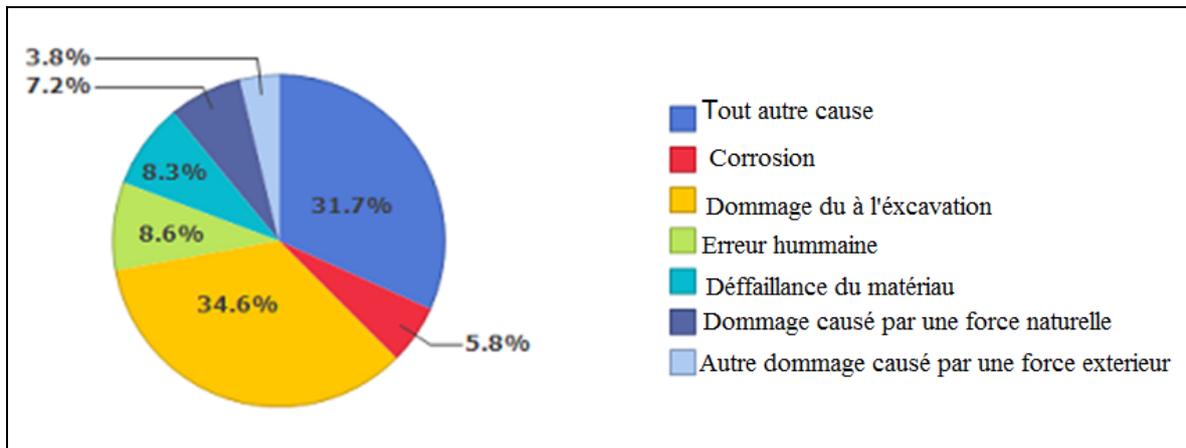


Figure.II.3 les causes des défaillances des canalisations [9]

II.5. Différentes méthodes de réparations

Les risques majeurs liés à l'endommagement des canalisations sont en régression ces 20 dernières années. Les accidents liés à la défaillance d'une canalisation en service, provoquent des pertes matérielles et surtout humaines [9]. Récemment, PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration), a publié une série de données répertoriant la plupart des incidents, comme illustré sur la (figure.II.4).

Les données indiquent une évolution à la baisse des incidents sérieux sur tous les types de canalisations de 1988 à 2008, cela est dû aux moyens d'inspection des pipelines et aux techniques de réparations de plus en plus performantes.

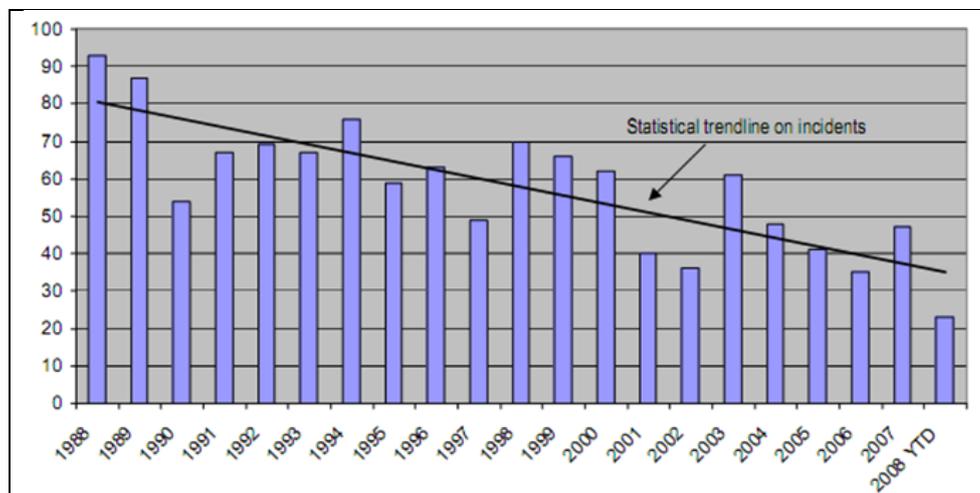


Figure.II.4 incidents sérieux de canalisations sur tous les types de canalisations [9]

En effet, aux tous débuts quand un segment d'une canalisation s'avère défectueux, l'une des méthodes de réparation est de couper le segment défectueux, après avoir arrêté l'arrivée du fluide transporté.

Cependant cette pratique est très coûteuse en termes de temps et d'argent. Par conséquent, la plupart des laboratoires de recherche soutenus par les compagnies d'exploitation des pipelines ont développé des méthodes de réparation en service et ces méthodes de réparation sont appliquées largement dans tous les pipelines pour le gaz naturel, le pétrole et les industries pétrochimiques.

La soudure sur une canalisation en service, appelé la soudure en service, est une technique qui est fréquemment utilisée dans la réparation des canalisations en service [10] (*figure.II.5*).



Figure.II.5 opération de soudage d'une demi-coquille sur un pipeline corrodé [11]

Une étude a été réalisée sur la réparation d'un pipeline de gaz en métal fonctionnant sous la pression interne de 6,9 MPa dont le diamètre est de 762 millimètres et l'épaisseur est de 17,5 millimètres [10].

Cette réparation est effectuée sur un tube dont les défauts sont usinés comme illustré sur la (*figure II.6-II.7*).

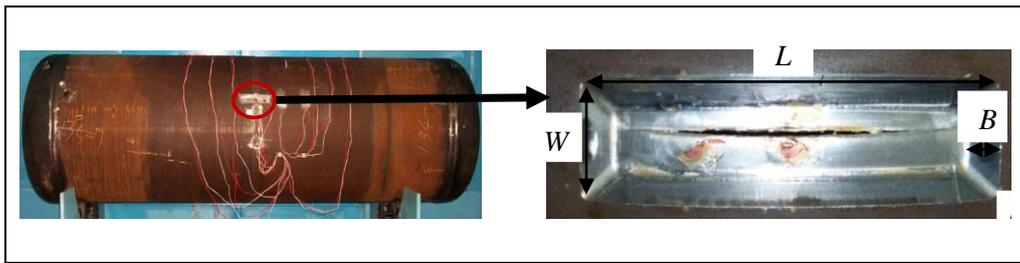


Figure.II.6 Défaut dans la zone du cordon de soudure, de dimensions : $L=200$; $W= 50$; $B=14$. [10]

Le tableau.II.1 résume les défauts usinés ainsi que les différentes méthodes de réparation étudiées [10].

Emplacement du défaut	Dimensions du défaut [mm]			Type de réparation
	L	W	B	
Métal de base	200	50	14	Soudage d'une demi-coquille
				Epoxyde + demi-coquille
				Ressort d'horloge
Zone du cordon de soudure	200	50	14	Soudage d'une demi-coquille
				Epoxyde + demi-coquille
				Empilement de 3 Ressort d'horloge
Entaille en V sur le métal de base (figure 2-6)	440	30	14	Epoxyde + demi-coquille
Métal de base	200	50	8.8	soudure de recouvrement avec 5 couches
Métal de base	150	50	11.5	soudure de recouvrement avec 6 couches

Tableau.II.1 classification des défauts et les méthodes de réparation effectuées [10]



Figure.II.7 défaut usiné avec entaille en V sur le métal de base [10]

II.5.1. La réparation par soudure d'une demi-coquille

La demi-coquille à une longueur de $L=800mm$ et une épaisseur $B=17.5mm$
On lui a effectué une soudure longitudinale et une soudure d'angle circonférentielle
(figure.II.8).

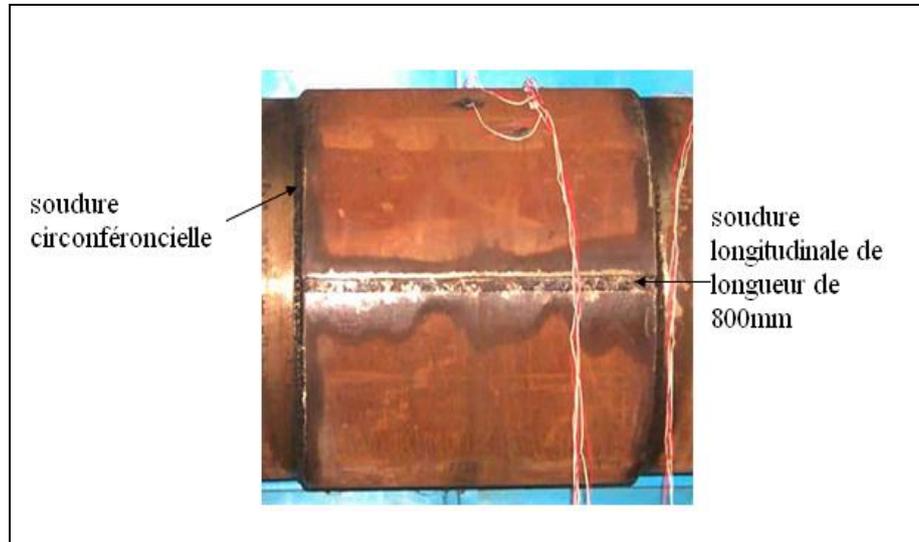


Figure.II.8 Réparation du défaut par soudure d'une demi-coquille [10]

II.5.2. La réparation par l'époxyde + demi-coquille

Les auteurs ont utilisés pour effectuer cette réparation, une demi-coquille de longueur $L= 970mm$; avec de l'époxyde et un durcisseur, pour combler le vide entre la paroi intérieur de la demi-coquille et la paroi extérieur du pipeline figure.II.9.

Le mélange d'époxyde et durcisseur sont injectés dans l'interface
Sous une pression de $700 KPa$.

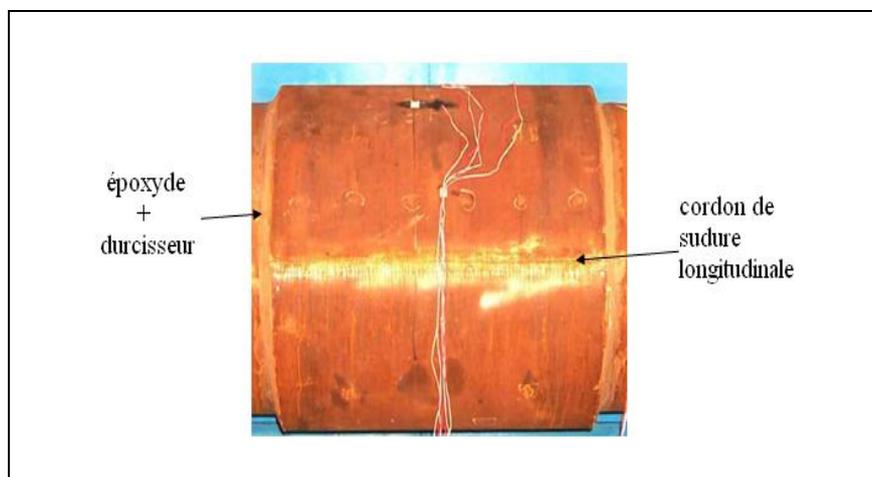


Figure.II.9 réparation par l'époxyde + demi-coquille [10]

Dans le cas de défaut de type Entaille en V sur le métal de base, il a été adopté une longueur du manchon de 1120 millimètres.

II.5.3 La réparation par ressort d'horloge

Dite composite rapping été faite en utilisant un ressort d'horloge d'une largeur de 304,8mm (figure.II.10).



Figure.II.10 réparation par ressorts d'horloge [10]

II.5.4. La réparation par soudure de recouvrement

Pour la profondeur de défaut avec 50% et 65% d'épaisseur de paroi, la réparation de soudure de recouvrement (figure.II.11).

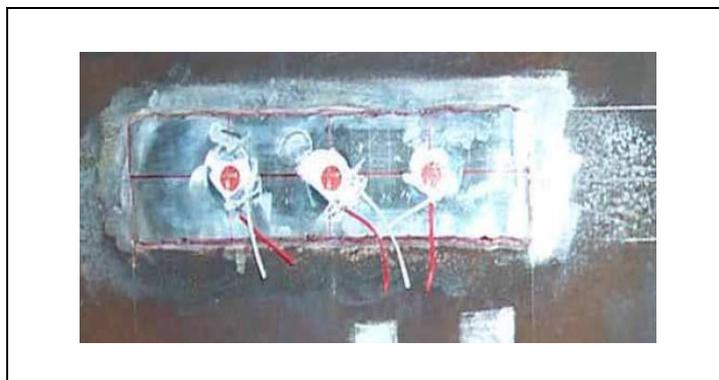


Figure.II.11 réparation par soudure de recouvrement [10]

Il faut retenir que la réparation par soudure (demi-coquille ou soudure de recouvrement) présente deux soucis importants :

1. possibilité de cuisson due au chauffage localisé (*figure.I.3*) ;
2. le taux de refroidissement élevés (*figure.I.4*).

C'est pourquoi les procédures appropriées de soudure doivent assurer une dureté optimale de la ZAT sans que celle-ci ne soit fissurée et ne subit aucune cuisson avec la puissance d'entrée appropriée de la chaleur [10].

Ces méthodes de réparation apportent un coefficient de sécurité de 2.5 avec une perte de métal de 80%, sauf que pour la réparation par soudure de recouvrement n'est efficace que pour une perte de matière de 65% pour éviter la cuisson du métal [10].

II.5.5.Réparation par meulage

M.Belalia et al [7] ont proposé une solution basée sur la modification de la géométrie du défaut (*figure.II.12*). C'est un traitement de géométrie améliorant le profil du défaut en éliminant les fissures existantes et réduisant la concentration de contraintes afférentes.



Figure.II.12 Eraflure éliminée par meulage [7]

II.5.6.Méthodes des industriels

II.5.6.1.Réparation par colmatage ou renforcement local

Cette méthode ne demande pas une bonne connaissance du matériau mais juste le sang froid de l'opérateur qui exécute l'opération si celle-ci peut se faire par exemple sur un pipeline présentant une fuite comme indiquer sur les (*figures II.13a - II.13b*) ;

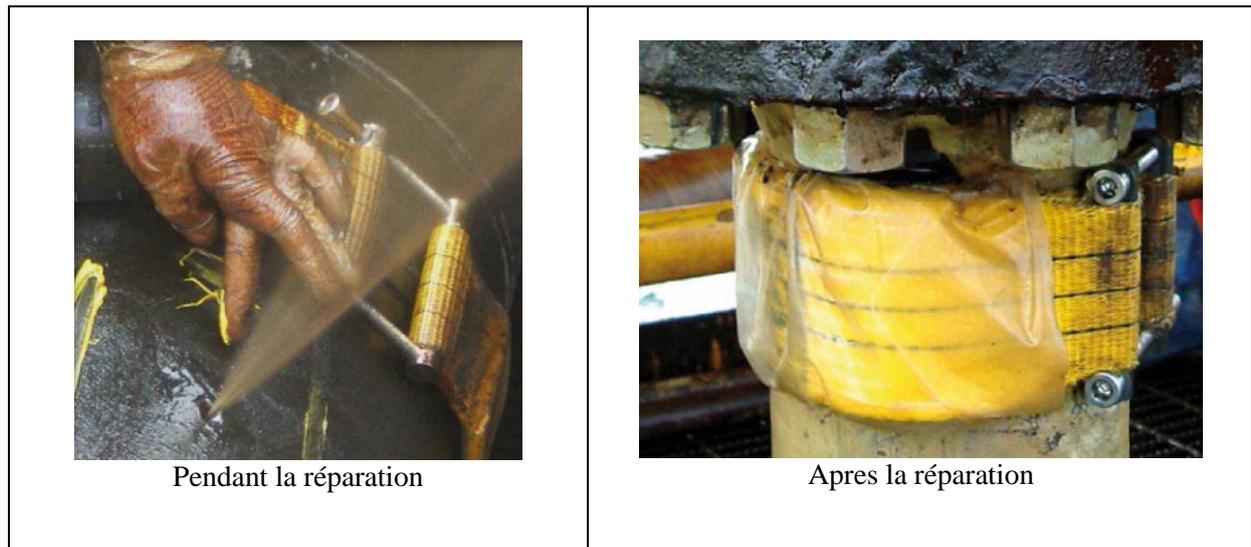


Figure.II.13a colmatage de fuite sous pression [12]



Figure.II.13b vue en plan d'un demi-manchon boulonnée pour arrêter la fuite de gaz [11]

Lorsque le revêtement anti corrosion de la conduite a rompus et que des défauts de corrosion apparaissent sur la surface extérieure du pipeline engendrant des pertes de matière, diminuant la résistance du tube. Comme indiquer sur les (figures II.14a - II.14b).



Figure.II.14a multitude de points de corrosion [11]

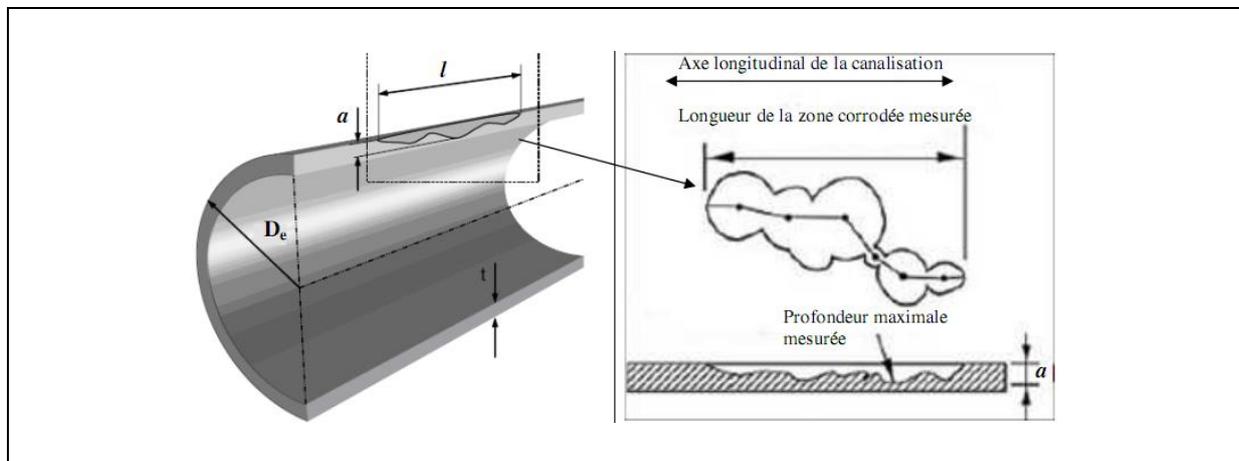


Figure.II.14b Géométrie d'un défaut de corrosion dans un pipeline selon ASME B31 [13]

Sur le marché des technique de réparation de ce genre de défaut, on propose plusieurs méthodes, et on juge plus crédible celle proposée dans les bibliographies [12 ; 14] montrées respectivement par les (figure II.15) et (figure II.16a).



Figure.II.15 Réparation composite pour canalisations corrodées [12]

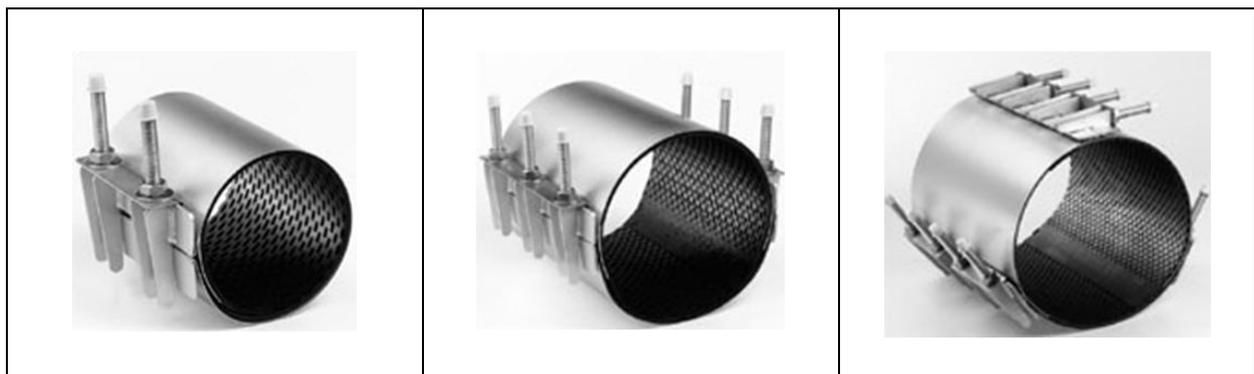


Figure.II.16a manchons de réparation en acier inoxydable [14]

Les produits présentés dans la (figure II.15a) peuvent servir à réparer une large gamme de défauts illustrés dans la (figure II.16b)

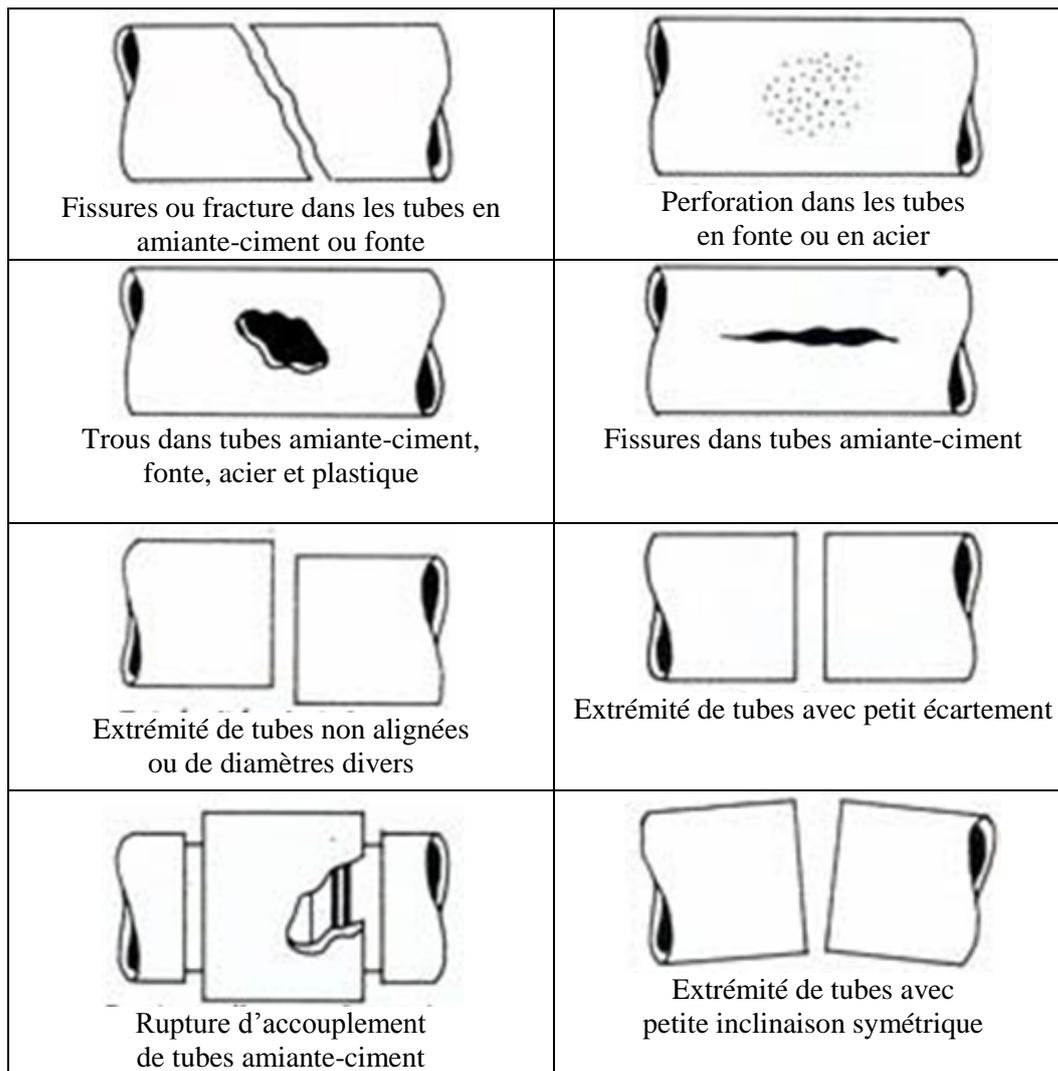


Figure.II.16b Application du manchon en acier inoxydable [14]

II.5.6.2. Techniques TRENCHLESS (réparation interne sans excavation)

En général, l'opérateur doit décider si la réparation, la rénovation ou le renouvellement de pipe (remplacement) est exigé. Un remplacement de pipe est nécessaire:

- quand la défaillance se produit dans des régions à fort trafic urbain ;
- quand le déterrement de la conduite défaillante, n'est pas favorable à l'environnement ;
- quand la réparation ou la rénovation est techniquement ou économiquement inadéquate ;
- quand la capacité hydraulique doit être améliorée par un pipe de diamètre supérieur ;

- quand la réparation ou la rénovation offre seulement une solution provisoire ;
- quand il y a demande d'une longévité durable de pipe.

Ce remplacement se fait soit :

1. Par éclatement de la conduite initiale (pipe bursting)

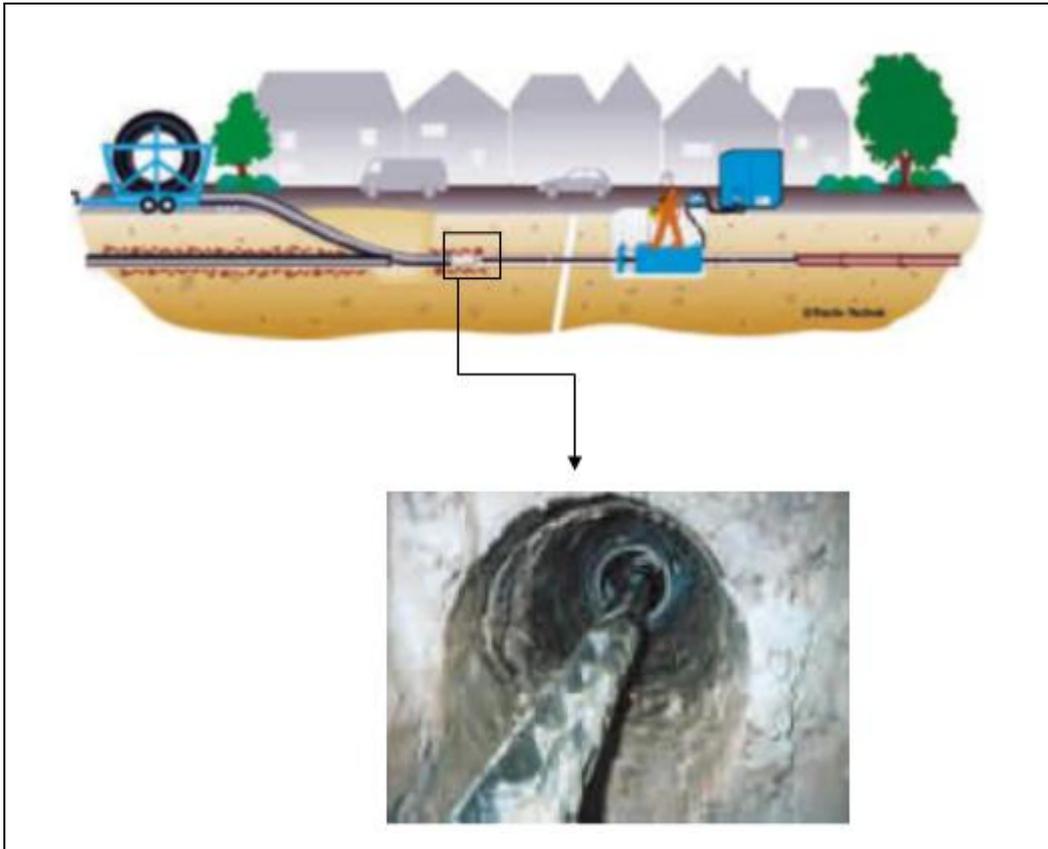


Figure.II.17 principe de remplacement par procédé pipe bursting [15]

2. Par introduction de tubes en polyéthylène, de diamètre extérieur est inférieur au diamètre intérieur de la conduite, dans cette dernière [16].

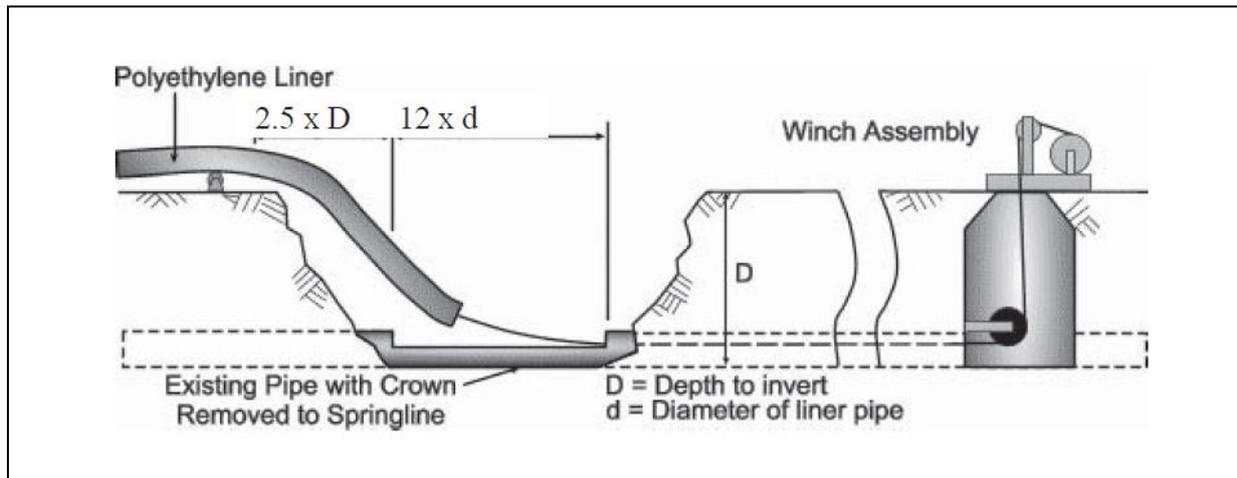


Figure.II.18 principe d'introduction d'un pipe en PE dans la conduite usée [16]

II.6. Les tubes en polyéthylène haute densité (PEHD)

L'utilisation du polyéthylène dans la fabrication des canalisations s'est développée au cours des 60 dernières années ; en effet les systèmes de transport réalisés en polyéthylène (PE) sont largement répandus dans l'approvisionnement en gaz, en eau et en carburant. En 2007, la demande mondiale des tubes fait en polyéthylène à haute densité (PEHD) était environ 3,7 millions de tonnes, avec une moyenne de croissance de 6% par an. Jusqu'à 4,9 millions de tonnes sont prévus pour 2012.

Les canalisations (PE) offrent plusieurs avantages par rapport aux canalisations métalliques: ils ont une bonne résistance à l'usure et à la corrosion, une faible densité, un prix réduit, une facilité d'installation, une production de forme complexe [17] sauf que des changements physico-chimiques et mécaniques peuvent se produire en service, en particulier, quand ils sont soumis à la charge cyclique qui mène à la nucléation et au risque de propagation de fissure dans diverses Positions sous différentes formes.

Guermazi et autres [17] ont démontré par analyse expérimentale qu'il y a une dégradation des propriétés mécaniques par le vieillissement de la canalisation.

On sait, que pendant l'extrusion du tube, de nombreux défauts et inclusions locaux sont produits figure (II-19). En service, la combinaison de ces facteurs dans la condition de charge (pression interne, moment de flexion, force axiale, etc...) et l'effet de l'environnement (la température, temps, etc...) ; tendent à réduire significativement la longévité des tubes.

Il a été prouvé que les fissures axiales sont beaucoup plus dangereuses que les fissures circulaires [18 ; 17] et que la géométrie de la fissure et le mode de sollicitation en un grand effet sur le mode de défaillance/ou rupture d'un système de canalisations, (figure.II.20). [17]

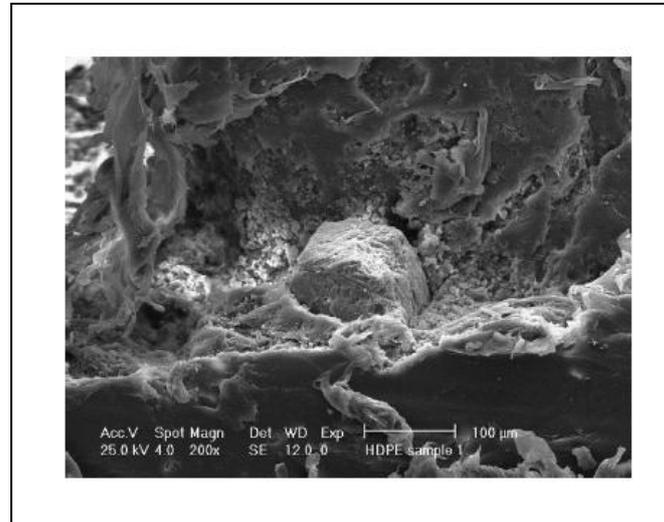


Figure.II.19 Inclusion à l'origine d'une fissure [18]

Dans beaucoup d'autres occasions, la rupture est induite par la présence des défauts extérieurs (éraflures, rayures,...etc.) induits par le processus d'extrusion ou tout autre chose pouvant provoquer une discontinuité géométrique plus au moins visible sur la surface externe du tube [18 ; 9], (figure .II.20).



Figure.II.20 Eraflure sur paroi externe d'un tube PEHD [9]



Figure.II.21 Rupture longitudinale d'un tube en PEHD [18]

II.6.1. La réhabilitation des performances des tubes PEHD endommagés

Excepté les méthodes de réparation susdites aucun programme d'études n'est effectué pour réparer spécifiquement les conduites faites de polyéthylène haute densité ; car du côté :

Des industriels leur devise est toujours amélioré les performances de leurs produits (tubes), (*figure.II.22a*) ; en avançant que la résistance à la fissuration du tube en PE 100 peut atteindre plus de 100 ans à 20°C. Comme il permet d'envisager un risque de fissuration sous contrainte pratiquement nul.

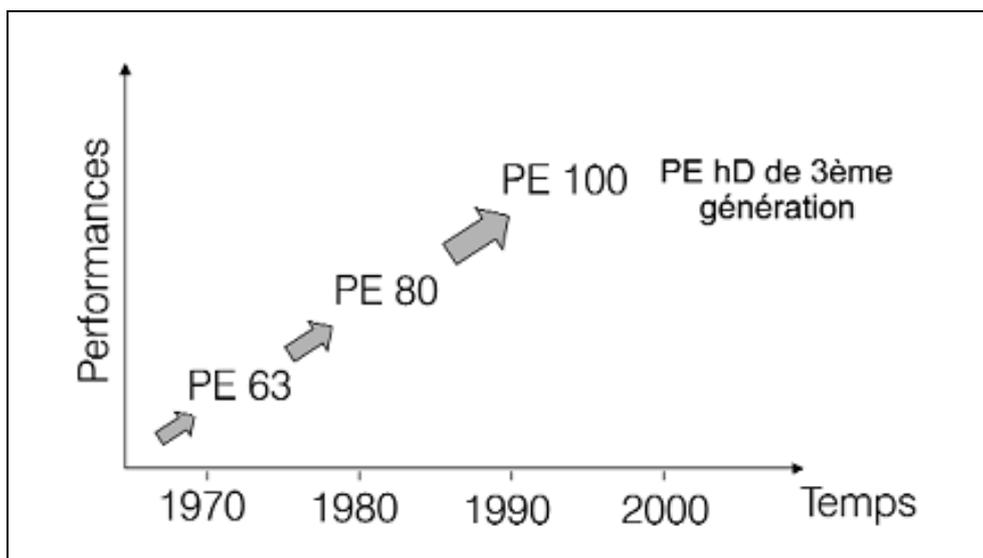


Figure.II.22a variation des performances du PEHD en fonction du temps [19]

La *figure.II.21b* montre l'évolution des propriétés mécanique des tubes PEHD ;

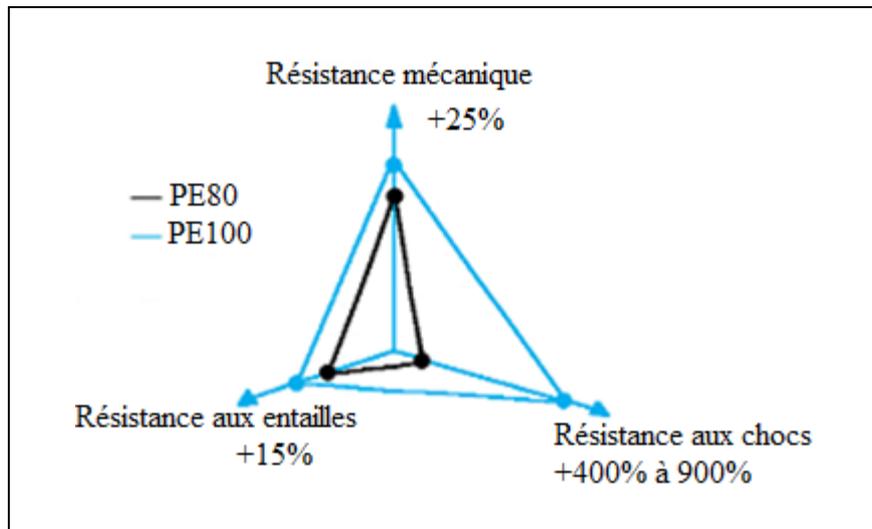


Figure.II.22b comparaison des caractéristiques du PE80 et du PE100 [19]

- Pour l'utilisateur, le remplacement n'est pas toujours possible pour des raisons de coût et de mise en œuvre ; et les solutions de réparation l'intéressent au plus haut point. dans cette optique et à la lumière des différentes techniques de réparation existantes, il a pensé à une technique qui est celle du meulage

Chapitre III

Le polyéthylène haute densité et analyse des entailles

III.1. Présentation du chapitre

Dans ce chapitre on présente le PEHD, son mode d'élaboration et son comportement mécanique dans le cas d'un matériau sain et dans le cas d'un matériau présentant un défaut telle qu'une fissure ou une entaille.

La technique de réparation par meulage est mise en œuvre et les résultats auxquels on aboutit par cette méthode, sont présentés sous-tendus par des fondements de mécanique de rupture.

III.2. Le polyéthylène

Le polyéthylène (PE) est le polymère de synthèse qui a la structure chimique la plus simple. Il appartient à la grande famille des polyoléfines [20].

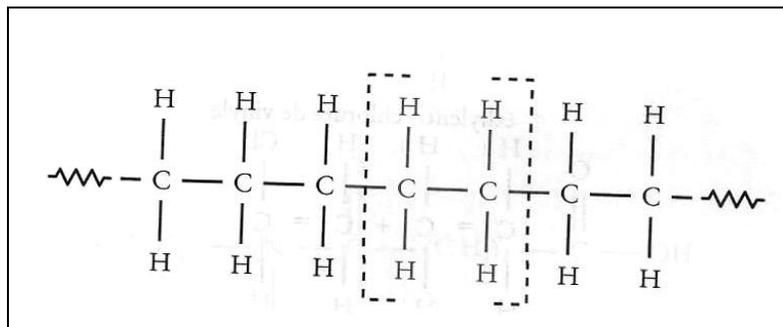


Figure.III.1 Motif de répétition du Polyéthylène [20]

III.2.1. Synthèses et caractéristiques structurales du PE

Le polyéthylène est issu de la polymérisation du monomère éthylène seul pour former un homopolymère, ou en présence d'un comonomère de type 1-alcène pour former un copolymère. Les deux voies essentielles pour fabriquer le polyéthylène haut densité sont des réactions de polymérisation catalysées par des systèmes à base d'oxyde de chrome ou des composés organométalliques de type Ziegler-Natta. La polymérisation effectuée en suspension continue « slurry », utilise un procédé de catalyse à basse pression. Depuis quelques années est apparue une voie de synthèse catalytique à base d'espèces dites métallocènes, permettant d'accéder à des PE plus homogènes [21].

III.2.1.1. Polymérisation de type Ziegler-Natta

C'est une polymérisation hétérogène qui se réalise sur la surface des cristaux de chlorure de titane, $TiCl_3$ et dans des conditions de températures et de pression relativement faibles respectivement à 30 à $100^\circ C$ et la pression atmosphérique à 100 [22]. Des sites de catalyse différents, engendrent une hétérogénéité d'activité de polymérisation qui donne naissance à une distribution de la masse molaire relativement large [21].

Les PE ainsi obtenus sont constitués de chaînes linéaires qui cristallisent bien ce qui lui conférant une masse volumique élevée de l'ordre de 955 à 970 Kg/m^3 et une appellation de PE haute densité (PEHD) [21 ; 22].

III.2.1.2. Polymérisation de type métallocène

Ce procédé est utilisé pour produire une gamme de copolymères éthylène- α -oléfine moins polydisperses que ceux obtenus avec le procédé Ziegler-Natta. Pour se faire on utilise des catalyseurs à base de métallocènes tels que les zirconocènes, où chaque molécule de catalyseur contient un seul type de site actif qui polymérise le monomère de manière identique [21].

Les catalyseurs de type métallocènes sont par conséquent communément appelés « Monosites» certains catalyseurs métallocènes ont la capacité de produire par transfère, des chaînes terminées par ($CH=CH_2$) qui peuvent être copolymérisées avec d'autres chaînes en croissances, sous le statut de macro-monomères produisant ainsi des macromolécules longues [22].

III.2.2. Structures cristallines et morphologies du PE

Un polymère thermoplastique semi-cristallin possède des zones cristallines et des zones amorphes. Sa structure est décrite à différents niveaux d'échelle de l'angström au micron (*figure.III.2*). L'échelle de quelques angströms correspond à l'arrangement conformationnel des chaînes (zigzag, hélice) dans les phases amorphe et cristalline. L'échelle de $0,1$ à $1,0 \text{ nm}$ met en jeu les interactions entre des segments de chaînes

voisins; le comportement de la phase amorphe est contrôlé par les interactions à cette échelle.

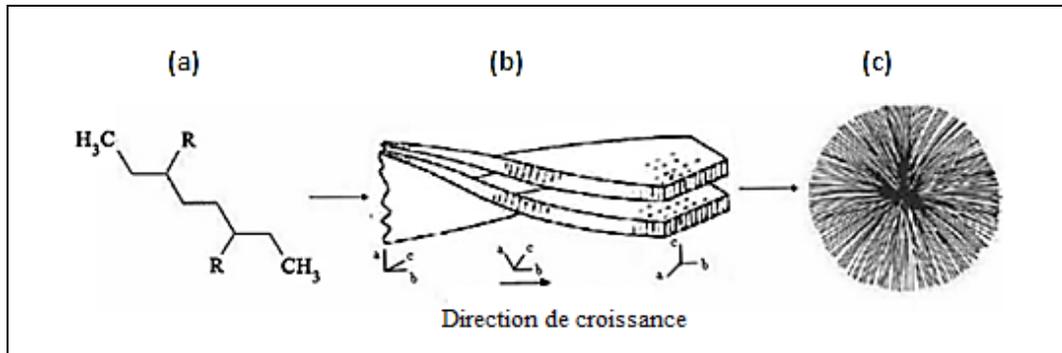


Figure.III.2 Différentes échelles d'organisation d'un polymère semi-cristallin :
 (a) conformation de chaîne, (b) lamelles cristallines, (c) sphérolites [22]

La particularité des propriétés du PEHD réside dans sa microstructure constituée d'une alternance de zones amorphe-cristalline, toute fois que cette dernière est caractérisée par [21]:

- L'arrangement des lamelles entre elles à l'échelle du micromètre.
- Les conditions sous lesquelles l'échantillon a cristallisé (température et durée du refroidissement)

Les assemblages ainsi formés sont des sphérolites, avec un taux de cristallinité de 73 à 80 %, car le temps de cristallisation est des plus long ; comme indiqué respectivement sur les (figures.III.3-III.4) [21].

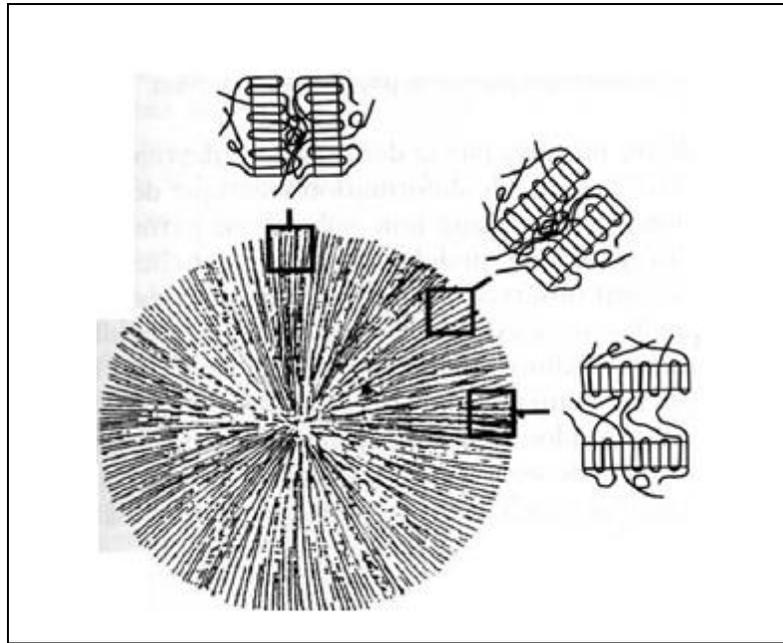


Figure.III.3 Schématisation de la structure d'un sphérolites et grossissement montrant l'amorphe inter lamellaire en différentes positions dans le sphérolites [21]

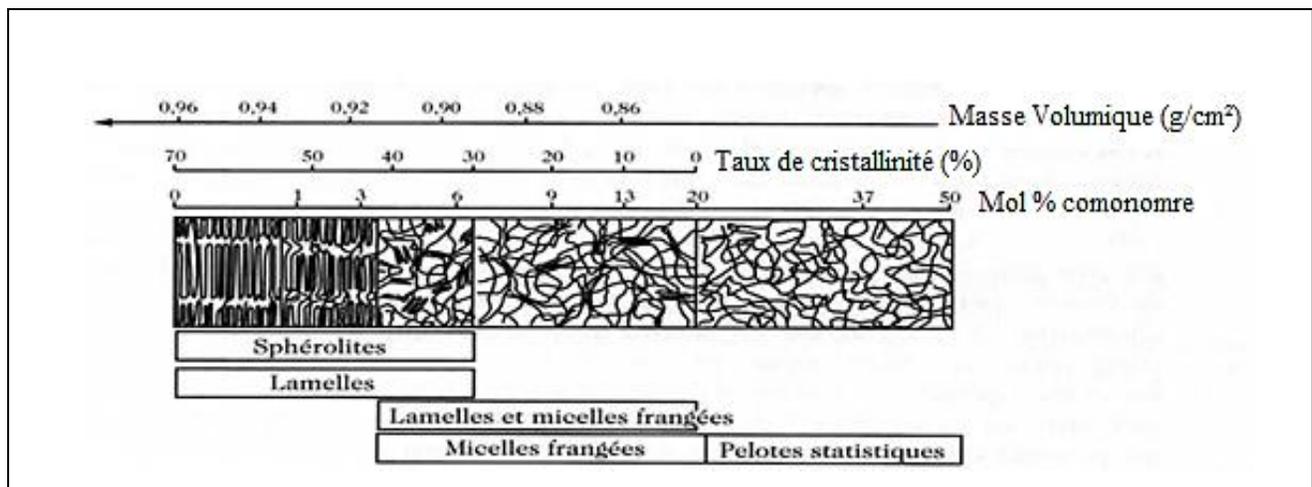


Figure.III.4 relation entre le taux de cristallinité et la masse volumique et la microstructure [21]

III.2.3. Propriétés mécaniques

De nombreuses études ont été consacrées à la caractérisation complète de la courbe de traction uniaxiale et à l'explication détaillée de ses différentes caractéristiques, certaines propriétés telles que le taux de déformation naturel restant encore à bien explorer [20].

Les propriétés mécaniques des PEHD dépendent de leurs morphologies cristallines et de leurs taux de cristallinité, la (figure.III.5) montre l'influence du taux de cristallinité sur la résistance à la traction des polymères [20].

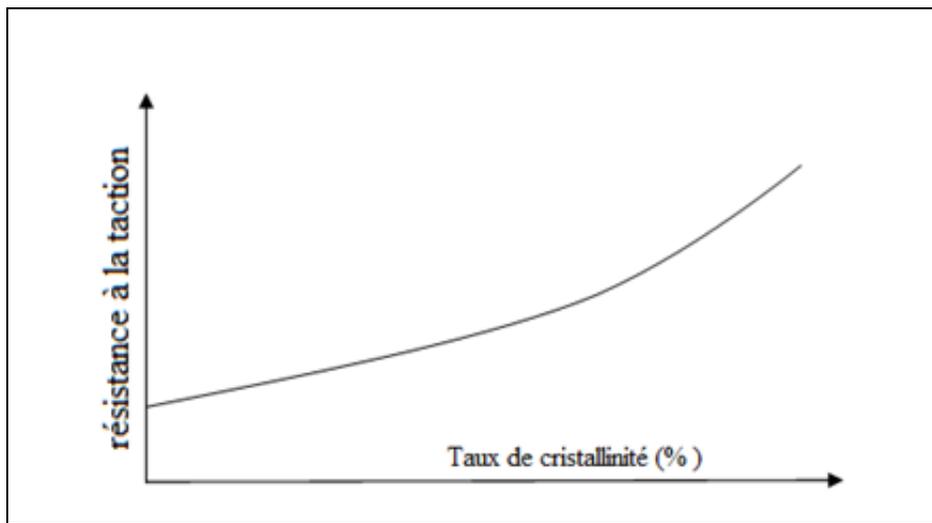


Figure.III.5 variation de la résistance d'un polymère en fonction de son degré de cristallinité [20]

Le *tableau III.1* résume les principales propriétés du PEHD

Propriétés		Effet de l'augmentation de :		
		La cristallinité	La masse molaire	L'indice de poly molécularité
Propriétés physiques	Masse volumique	↗	↘	=
	Etirabilité à l'état fondu	=	↘	↘
	Retrait de moulage	↘	↗	↗ un peu
	brillance	↗	↗	↘ un peu
	Rigidité	↗	↗ Un peu	↘ un peu
	Dureté	↗	↗ un peu	=
	Résistance à l'abrasion	↗	↗	=
	Résistance en traction à la limite élastique	↗	↗	=
	Allongement à la rupture	↘	=	=
	Résistance au choc	↘	↗	=
	Résistance au fluage	=	↗	=
Propriétés thermique	Température de fusion	↗	=	↗
	Température de ramollissement	↗	=	↗
Propriétés chimiques	Résistance aux produits chimique	↗	↘	=
	Perméabilité aux gaz	↘	↘ un peu	=
	Résistance à la fissuration sous contrainte	↘	↘	complexe
		↗ : augmentation	↘ : diminution	= : pas de variation

Tableau.III.1 Evolution des principales propriétés de PEHD en fonction des paramètres structuraux

[23]

III.3. Comportement plastique du PEHD

Une des caractéristiques les plus remarquables des PEDH est leur faculté à subir une grande déformation plastique avant la rupture à température ambiante. Ce phénomène provient en partie du fait que la température de transition vitreuse des parties amorphes ; est située bien au-dessous de la température ambiante.

Pour les polymères semi-cristallins la déformation plastique intervient de façon macroscopique et non homogène au cours d'essai de traction.

Ce phénomène de déformation plastique appelé striction ou instabilité plastique

III.3.1. Epreuve sans entaille

La (*figure.III.6*) montre l'allure typique de la courbe contrainte-déformation nominale en traction uniaxiale d'une éprouvette plane dont la forme est présentée sur la même figure , et l'évolution du profil de l'éprouvette tandis que celle-ci est étirée à vitesse d'allongement constante [22].

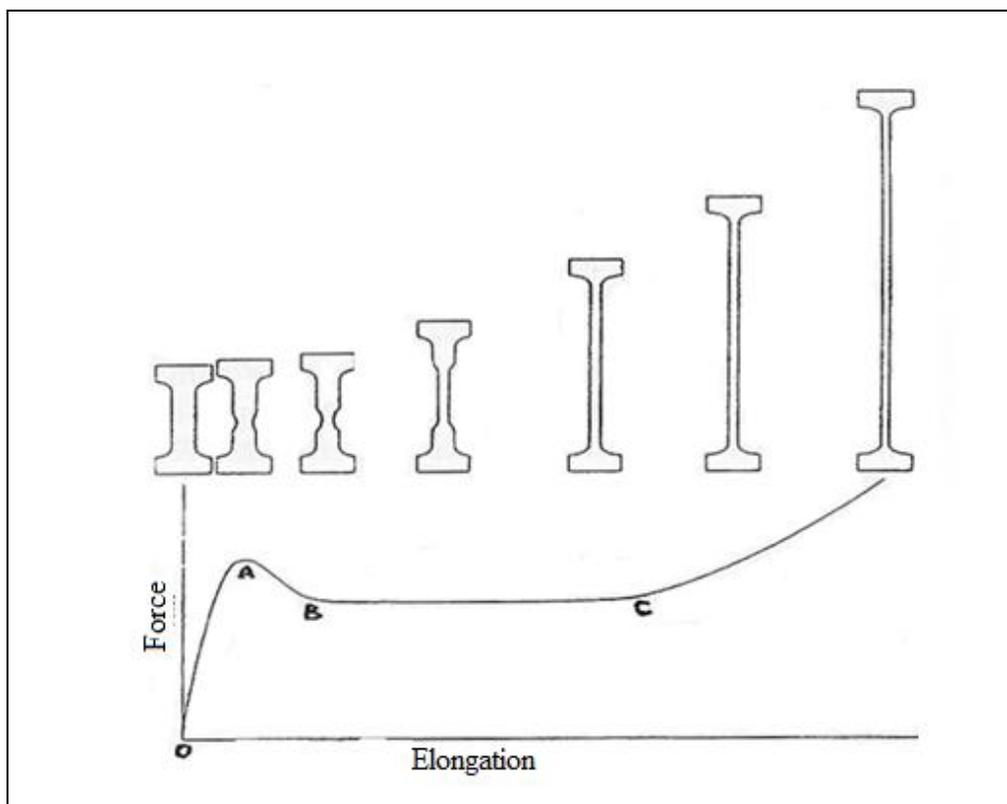


Figure.III.6 Courbe contrainte-déformation d'un polymère semi-cristallin en traction uniaxiale [22]

A partir de cette courbe, on peut décrire les différents types de déformations :

- de 0 à A il s'agit de la déformation élastique réversible du matériau.

La courbe, initialement linéaire, fait apparaître une certaine non-linéarité juste avant le point A, par suite des effets viscoélastiques, [22]

- au point A débute la striction qui correspond à une déformation hétérogène du matériau ; les couches amorphes dans les polymères peuvent tous conduire à une distribution non uniforme de la contrainte [21,22]; le point A est appelé seuil de plasticité,
- de A à B la striction se forme jusqu'à stabilisation,
- de B à C la striction se propage le long de l'échantillon jusqu'au taux naturel de déformation,
- au-delà de C, la déformation redevient homogène grâce à un durcissement structural lié à l'orientation des chaînes macromoléculaires dans le sens de l'étirage et l'augmentation de la fraction fibrillaire du matériau. [22]

III.3.2. Eprouvette avec entaille (SENT)

La courbe ci-dessous montre le comportement mécanique d'une plaque en PEHD entaillée

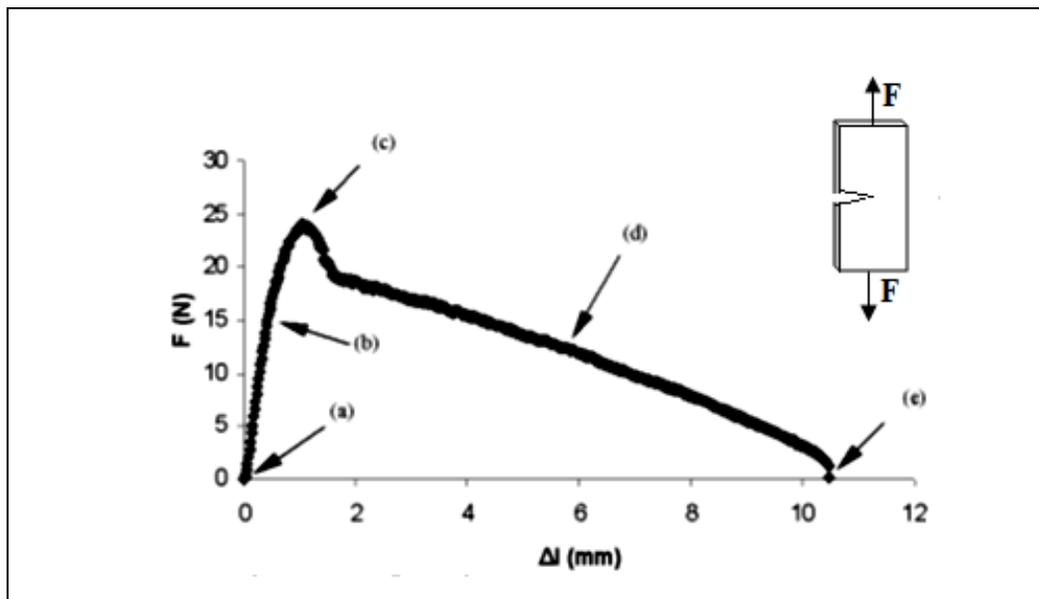


Figure.III.7 courbe charge-taux de déplacement du PEHD entaillé [22].

Au cours de la déformation du PEHD entaillé une séquence d'évènements successifs se produit comme énuméré sur la *figure.III.7* :

- (a) : l'ouverture et l'émoussement des extrémités initiales de la fissure,
- (b) : la formation de la zone plastifiée à chaque bout de fissure (la zone blanche),
- (c) : la plastification complète de la longueur du ligament,
- (d) : Le cisaillement ductile du ligament,
- (e) : l'endommagement entier de l'éprouvette testée.

III.4. La réparation des fissures par la modification géométrique

La singularité de contrainte en tête de fissure contribue à augmenter sa propagation et réduire la durée de vie des structures fissurées. Une des techniques la plus utilisée, permettant de réduire les effets néfastes d'une fissure, consiste à éliminer cette singularité, en effectuant un enlèvement de matière via le procédé de meulage [24].

III.4.1. Technique du meulage

Le meulage est basé sur le principe d'élimination des fissures par enlèvement de matière *figure.III.8*. Ainsi la singularité créée par le front de la fissure est éliminé.

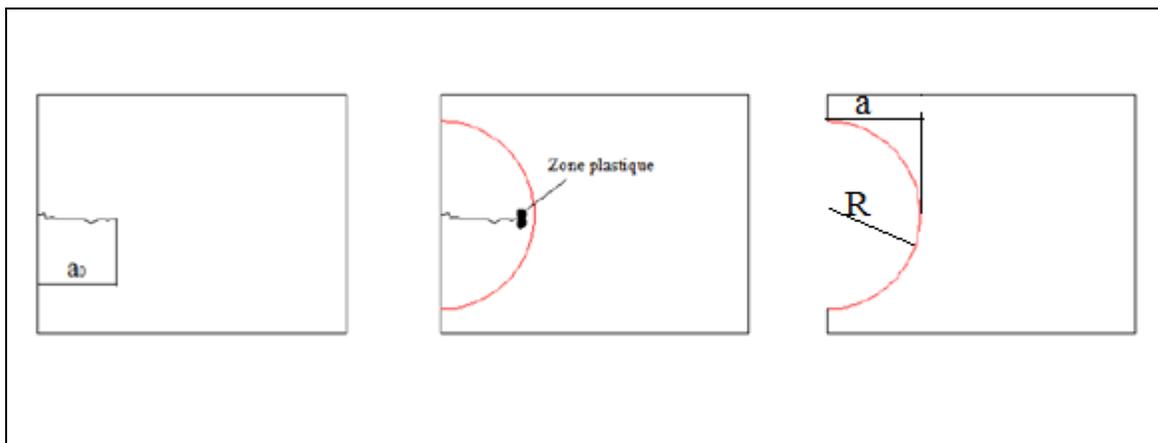


Figure.III.8 schéma de principe du meulage [24]

C'est une technique économique. Ce type de réparation peut engendrer de bons résultats en termes de durée de vie moyennant quelques précautions élémentaires au niveau de sa mise en œuvre. Le meulage peut cependant fragiliser la structure du fait de la

diminution localisée de la section. Ce qui nécessitera une vérification par les calculs de la tenue mécanique de telles structures après traitement. Rodriguez et al ont étudié la réparation de fissures par le meulage, ils ont trouvé que la durée de vie d'une pièce fissurée après meulage est associée à la profondeur de la réparation, ce qui leur a permis dans une autre étude de considérer que la géométrie de la réparation est fonction respectivement de la profondeur d'entaille (a) et du rayon d'entaille (R). Les résultats de leurs travaux montrent que, pour une profondeur fixée, le facteur de concentration de contrainte diminue avec l'augmentation du rayon, voir (*figure.III.9*). [24]

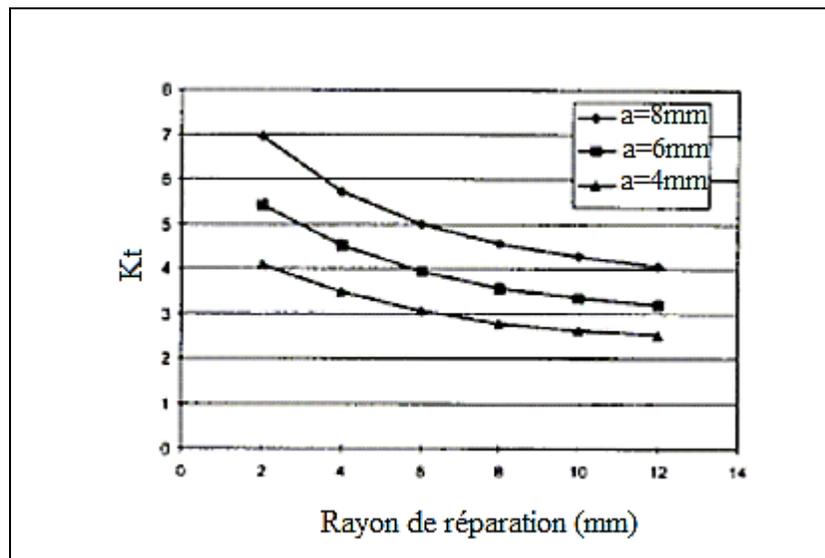


Figure.III.9 Facteur de concentration de contrainte en fonction du rayon de réparation [24]

III.5. Rappels des concepts de la mécanique de la rupture

L'étude du comportement des matériaux au voisinage des singularités de forme défaut, fissure et discontinuité de forme fonctionnelle, utilise la mécanique de la rupture ; qui est un outil fondamental au niveau de conception et de contrôle. Elle est utilisée dans les bureaux d'études, soit à la conception pour estimer la durée de vie nominale d'une structure, soit en service, lorsqu'on détecte un défaut, pour calculer la durée de vie résiduelle de la structure [20 ; 25].

En mécanique de la rupture, on dispose de deux grandes méthodes pour analyser la fiabilité d'une structure pour un matériau donnée : soit l'approche globale qui comme son nom l'indique utilise des grandeurs globales mesurables comme l'énergie nécessaire à l'amorçage de la fissure de rupture, ou l'approche locale qui s'est beaucoup développée grâce à la performance des code de calculs avec lesquels on peut accéder à des variables locales.[25]

III.5.1. Concept de l'intégrale J

La mécanique linéaire élastique de la rupture concerne les matériaux dont le comportement est parfaitement élastique, linéaire et fragile ; elle permet de dégager deux paramètres caractérisant le comportement d'un matériau face à une fissure et est appliquée selon deux approches : une approche énergétique développée par Griffith (1920), qui considère la manière selon laquelle le matériau restitue de l'énergie au cours de sa fissuration. Elle introduit le taux de restitution d'énergie élastique G . Et l'approche mécanique développée par Irwin (1958), évalue l'intensité du champ de contrainte en pointe de fissure et définit un facteur d'intensité de contrainte K .

Pour certains matériaux de ductilité très élevée tel que le PEHD, il est difficile d'obtenir une caractérisation juste car la taille de la zone plastique modifie la distribution du champ de contraintes qui n'est plus paramétrés par K . dans ce cadre, il est conseillé, pour ces matériaux, d'appliquer les concepts de la mécanique élasto-plastique de la rupture.

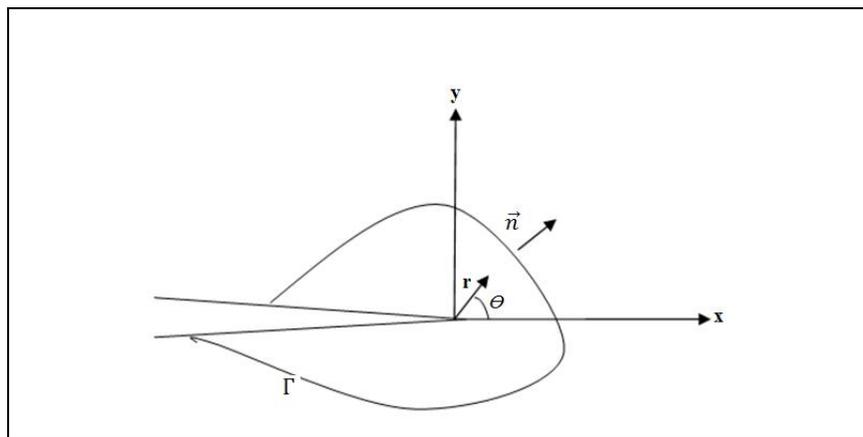


Figure.III.10 Contour arbitraire autour du front de la fissure [20]

L'intégrale J a été développée par Rice (1968) et utilisée comme une alternative au facteur d'intensité de contrainte, car étendue à la rupture élasto-plastique. L'intégrale J est définie pour un problème à deux dimensions (2D) par l'équation ci-dessous :

$$J = \int_{\Gamma} W dy - T \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) ds \quad \text{III.1}$$

Où W est la densité d'énergie de déformation définie par

$$W = W(\varepsilon_{ij}) = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{pq} d\varepsilon_{pq} \quad \text{III.2}$$

Γ est un contour entourant le front de la fissure, T est le vecteur contraint défini par le vecteur normal \vec{n} tout le long du contour $T_i = \sigma_{ij} n_j$ et u est le vecteur de déplacement

III.5.1.1. Expression du paramètre J

Quand la zone pastique est plus étendue autour de la pointe de fissure, et dans l'hypothèse des chargements proportionnels croissant, le paramètre de chargement à prendre en considération est le paramètre J , qui est défini comme étant la variation de l'énergie potentielle lorsque la fissure se propage d'une quantité da

$$J = - \frac{\partial \left(\frac{U}{B} \right)}{\partial a} = - \frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad \text{III.3}$$

Où B est l'épaisseur de l'éprouvette.

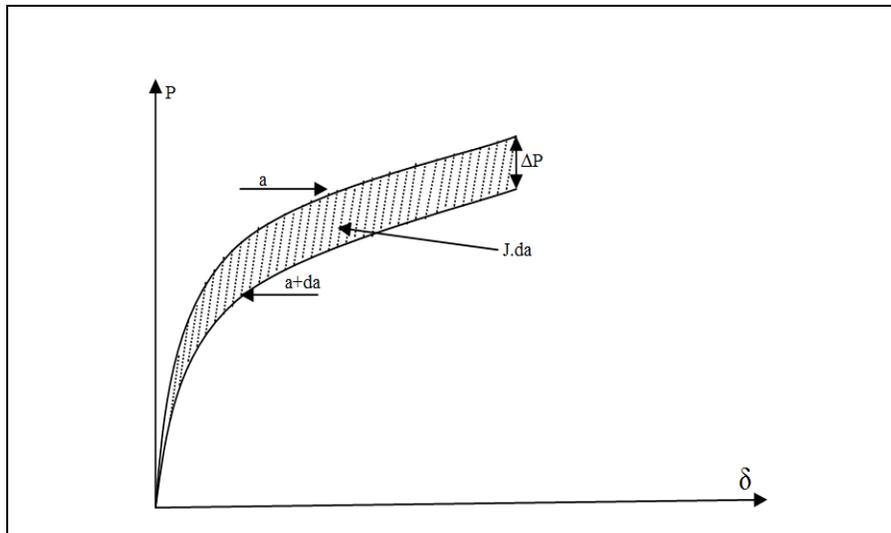


Figure.III.11 interprétation énergétique de l'intégrale J [20]

Alternativement, en considérant la courbe charge-déplacement $P = f(\delta)$, *figure.III.11* d'un corps fissuré pour deux longueurs de fissure voisines a et $a+da$, et par analogie à l'interprétation de l'énergie dissipée dans le cas de l'élasticité linéaire, l'aire comprise entre les deux courbes estime $J \cdot da$. Ainsi J peut être estimé à partir de la relation ci-dessous :

$$J = \int_0^\delta \frac{\partial P}{\partial a} d\delta = \int_0^P \frac{\partial \delta}{\partial a} \partial P \quad \text{III.4}$$

Où P est la charge appliquée par unité d'épaisseur et δ le déplacement mesuré au niveau de la ligne de charge.

III.5.2. Répartition des contraintes à la pointe d'une fissure

Les changements locaux de la géométrie d'une structure, soumise à un chargement monotone ou cyclique, peuvent engendrer une amplification locale du champ de contraintes par rapport à sa valeur moyenne, c'est la notion de concentration des contraintes. Cette notion entraîne un affaiblissement significatif de la structure.

La (*figure.III.12*), montre une plaque soumise à une traction uniaxiale, les lignes de forces sont parallèles, voir (*figure.III.12a*). Par contre à la pointe d'une fissure elles se concentrent, accroissant très fortement l'intensité de la contrainte locale voir (*figure.III.12b*) donnant naissance à une singularité [21 ; 24].

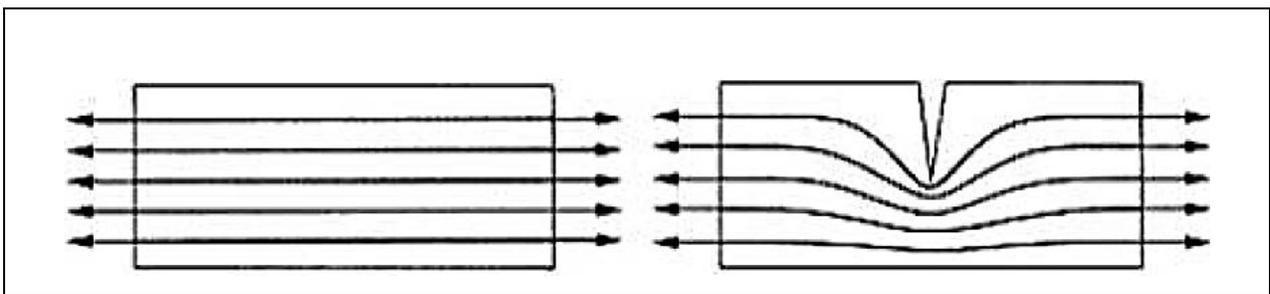


Figure.III.12 Variations locales de géométrie et concentration des contraintes [24]

Dans le cas d'une fissure, Irwin propose de décrire la distribution des contraintes et des déplacements, en mode I, au voisinage du front d'une fissure par les relations suivantes

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \end{cases} \quad \text{III.5}$$

$$\begin{cases} u = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}\right) \\ v = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2}\right) \end{cases} \quad \text{III.6}$$

Où μ et ν sont respectivement le module de cisaillement et le coefficient de poisson.

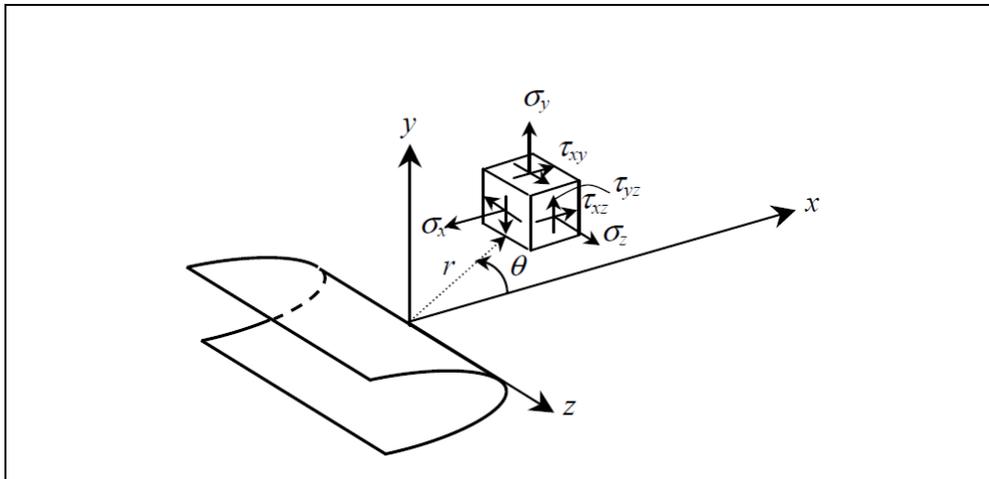


Figure.III.13 Élément de volume au voisinage d'un front de fissure rectiligne [24]

Les paramètres r et θ , définis dans la (figure.III.13), sont les coordonnées polaires de la zone mesurée à partir du fond d'entaille. D'après Irwin la seule connaissance du facteur d'intensité de contraintes, permet de décrire la répartition des contraintes au

voisinage du front de fissure. Il dépend à la fois de la géométrie de la fissure et de la nature des sollicitations auxquelles la structure est soumise.

Le facteur d'intensité de contrainte, en mode I et en un point donnée du front de fissure, peut être déterminé par l'expression suivante :

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_y \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8(1-\nu^2)} |\nu| \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \right) \quad \text{III.7}$$

Le champ de contraintes calculé en élasticité présente une singularité à la pointe de fissure. Comme les contraintes infinies sont physiquement impossibles, il est donc nécessaire que le matériau à proximité de la pointe plastifie (ou limite les contraintes par quelque autre type de mécanisme non linéaire).

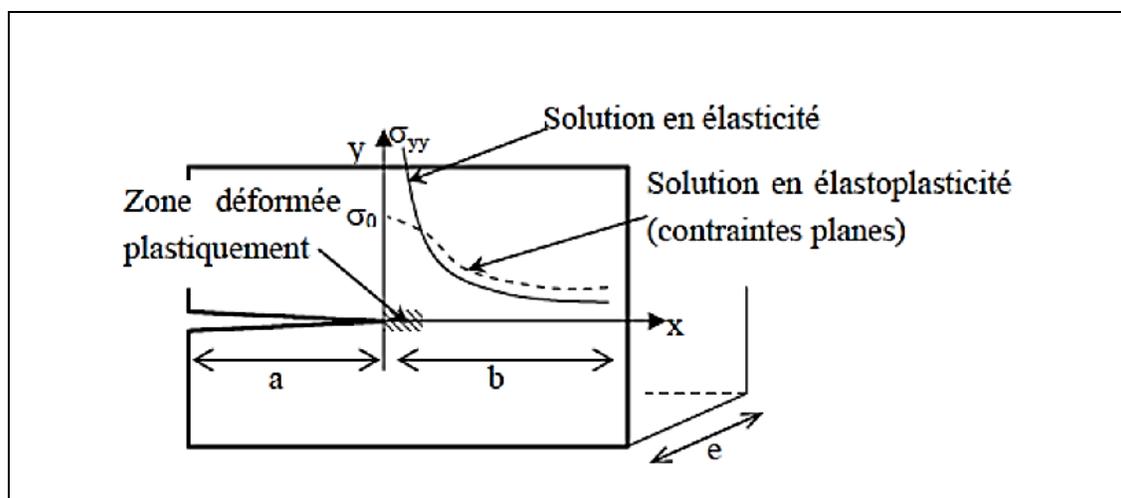


Figure.III.14 Correction élasto-plastique de la répartition des contraintes [24]

III.5.3. Répartition des contraintes en fond d'entaille

Creager et Paris ont montré qu'au fond d'une entaille de rayon ρ , la distribution des contraintes est identique à celle d'une fissure, sauf que cette répartition est déplacée de $\rho/2$ du fond d'entaille, voire *figure.III.15*, modifiant ainsi l'expression du champ des contraintes en mode I

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) - \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{\rho}{2r}\right) \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{\rho}{2r}\right) \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} - \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{\rho}{2r}\right) \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \end{array} \right. \quad \text{III. 8}$$

Avec

$$K_I = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \lim_{\rho \rightarrow 0} \sigma_{yy}^{\max} \sqrt{\rho} \quad \text{III. 9}$$

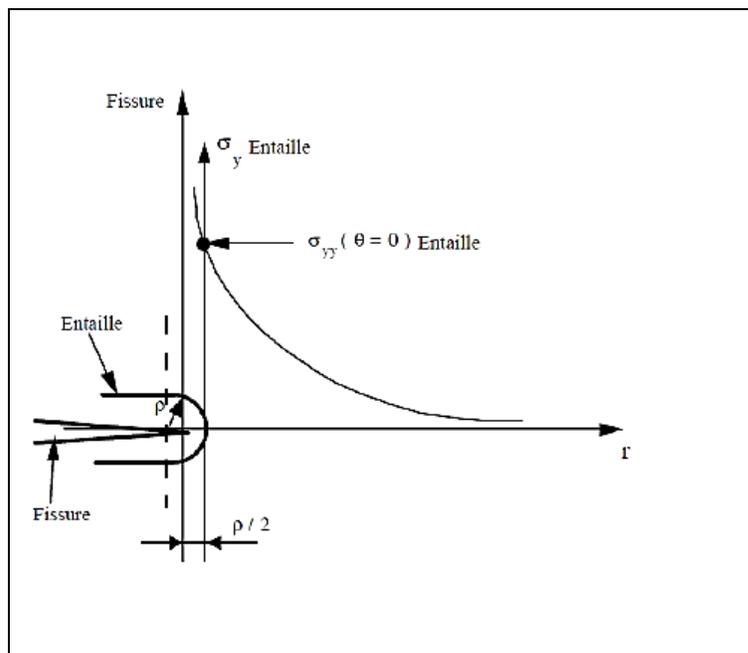


Figure.III.15 Répartition des contraintes en fond d'entaille [24]

III.5.3.1. Distribution des contraintes élastiques et élasto-plastique en fond d'entaille

Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire la répartition des contraintes en fond d'entaille, ils sont présentés dans les *tableaux III-2a et III-2b*.

La *figure.III.16* montre le schéma d'une distribution des contraintes au fond d'une entaille semi-elliptique.

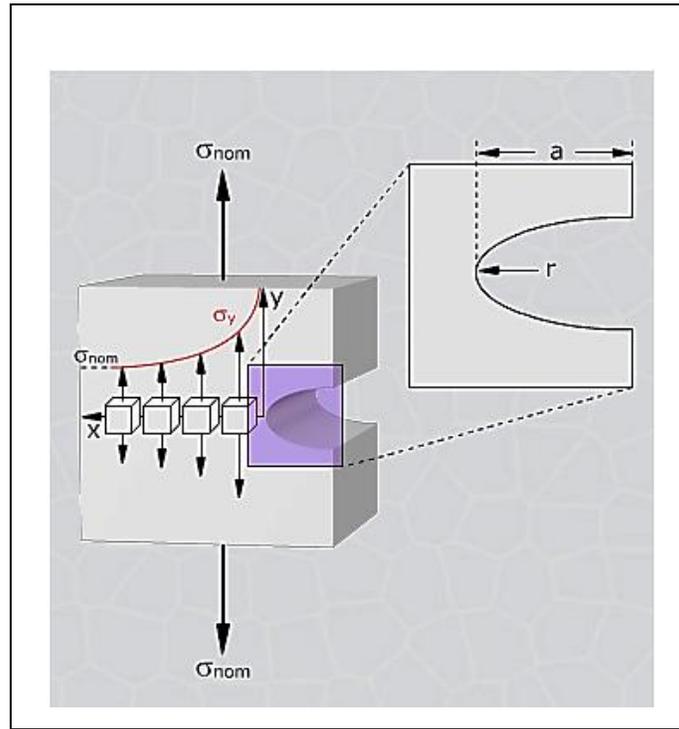


Figure.III.16 schéma d'une distribution de contraintes [20]

Auteurs	Modèles de répartition des contraintes élastiques
Timoshenko	$\sigma_{yy} = \sigma_{nom} \left[1 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{2\rho} \right)^{-2} + \frac{3}{2} \left(1 + \frac{x}{3\rho} \right)^{-4} \right]$ <p style="text-align: right;">III.10</p> <p style="text-align: center;">Entaille circulaire dans une plaque infinie soumise à la traction</p>
Neuber	$\sigma_{yy} = \sigma_{max} \sqrt{\frac{\rho}{\rho+4x}}$ <p style="text-align: right;">III.11</p>
Chen-Pan	$\sigma_{yy} = \sigma_{max} \sqrt{\frac{\rho}{\rho+8x}}$ <p style="text-align: right;">III.12</p>
Usami	$\sigma_{yy} = \frac{1}{3} K_I \sigma_{nom} \left[1 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{2} \right)^{-2} + \frac{3}{2} \left(1 + \frac{x}{2} \right)^{-4} \right]$ <p style="text-align: right;">III.13</p>
Glinka-Newport	$\sigma_{yy} = \frac{1}{2} K_I \sigma_{nom} \left[\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{\rho} \right)^{-1/2} + \frac{\sqrt{2}}{4} \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{\rho} \right)^{-3/2} + \right.$ $\left. \frac{1}{6} \left(1 + \frac{x}{\rho} \right)^{-2} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{\rho} \right)^{-4} \right]$ <p style="text-align: right;">III.14</p>

Tableau.III.2. Différents modèles décrivant la répartition des contraintes normales au plan d'entaille (σ_{yy}). [24].

Auteurs	Modèles de répartition des contraintes élastoplastiques
G. Kirsch	$\sigma_x = \frac{1000}{2} \left(2 + \frac{0.1^2}{y^2} + 3 \frac{0.1^4}{y^4} \right)$ <p style="text-align: right;">III.15</p>
Hill	$\sigma_1 = 2k \left[1 + \ln \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) \right]$ <p>Où $k = \sigma_1 - \sigma_3$ est la limite d'élasticité en cisaillement, σ_1 et σ_3 sont les contraintes principales.</p>
Tetelman-McEvily	$\sigma_1 = \left(\frac{2}{3} \right)^{1/2} R_c \left[1 + \ln \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) \right]$ <p>Où R_c est la contrainte d'écoulement obéissant à la loi de comportement de type Ramberg-Osgood.</p>
Xu	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = Q_r \exp \left(-A a_1 n x / \rho \right) \left[1 + \ln \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) \right]$ <p>Ou :</p> <p>σ_1 est la contrainte de référence élastique, n le coefficient d'écrouissage, a_1 une constante de déformation, $A=0.85$ (valeur expérimentale),</p> $Q_r = \left(\frac{2}{3} \right)^{1/2} \left(\frac{\epsilon_{pr}}{a_2 \epsilon_0} \epsilon \right)^n$ <p>Ou :</p> <p>ϵ_{pr} est la déformation plastique effective en fond d'entaille, ϵ_0 est la déformation élastique de référence et a_2 une constante.</p>
Tetelman	$\sigma_{yy} = R_e \left[1 + \ln \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) \right]$ <p>Ou :</p> <p>R_e est la limite d'élasticité (critère de Tresca)</p> <p>$0 < x < r_B$ est la position du point de contrainte maximale.</p> $\sigma_I = R_e \left[1 + \ln \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) \right]$ <p>Avec $0 < x < r_y$ est la taille de la zone plastique déterminée par l'intersection de σ_I (contrainte plastique) et de σ_{II} (contrainte élastique),</p> <p>Ou : $\sigma_{II} = \sigma_{nom} k_1 \sqrt{\frac{\rho}{\rho+4x}}$ pour $r_y < x < L$ et $L = \rho / 4(k_t^2 - 1)$</p>

Tableau.III.3. modèles des contraintes élastoplastiques en fond d'entaille [24]

III.5.4. Concentrations des contraintes

Une concentration de contrainte est causée par une discontinuité géométrique qui entraîne une élévation de la contrainte maximum et de la triaxialité (contrainte isostatique moyenne) par rapport aux valeurs moyennes calculées sur la base d'une section nette.

Les concentrations de contraintes peuvent servir d'origine aux fissures de fatigue ou aux ruptures instables. Elles donnent aussi lieu à des plastifications locales, qui si elles restent limitées jouent souvent un rôle bénéfique en redistribuant les contraintes et en diminuant ainsi leur concentration quand les contraintes résiduelles sont compressives.

Le coefficient de concentration de contraintes k_t est défini par l'équation III.20.

La concentration plus ou moins importante des contraintes dans les zones de la discontinuité géométrique est désormais mesurée par le facteur de concentration de contraintes schématisé par la (figure.III.17) :

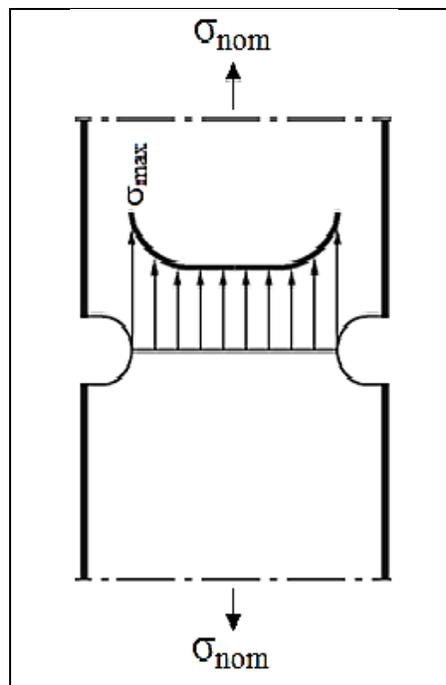


Figure.III.17 Effet de la concentration de contrainte dans une entaille symétrique [24 ; 25]

Le facteur de concentration de contrainte est défini par :

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

III. 20

CHAPITRE IV
ETUDE
EXPERIMENTALE

IV.1.Introduction

Pour étudier la singularité des contraintes au fond d'entaille et l'influence du rayon de courbure sur le comportement mécanique d'un matériau, on se rapporte généralement à l'essai de fatigue ou à l'essai de traction, ce dernier est retenu dans le cadre de notre étude.

IV.2. Réalisation des éprouvettes de traction

Les éprouvettes ont été réalisées au niveau du Hall Technologique de Oued-Aissi. Suivant les étapes énumérées ci-dessous :

Etape 1

Prélèvement sous forme de parallélépipèdes et dans le sens circonférentielle d'un tube de PEHD destiné à l'adduction d'eau potable de rayon extérieur de 30 cm et d'épaisseur égale à 3cm.

Le parallélépipède est découpé du tube à l'aide d'une tronçonneuse électrique puis on utilisant une scie mécanique on lui a donné la forme aux dimensions de la (*figure.IV.1*).

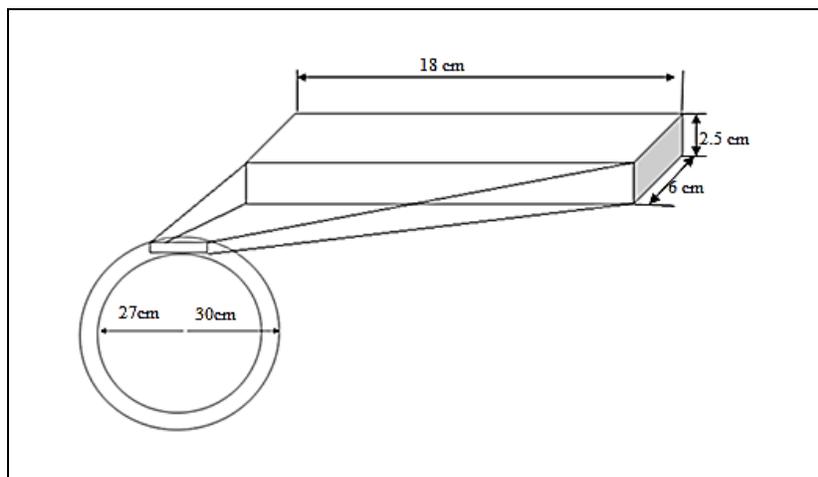


Figure.IV.1 découpe de parallélépipèdes utilisés pour l'usinage des éprouvettes

Etape 2 Au moyen d'une scie mécanique la pièce ainsi obtenue est ensuite découpé en deux voir (*figure IV-2*). Dans le but de minimiser le temps d'usinage sur la fraiseuse.

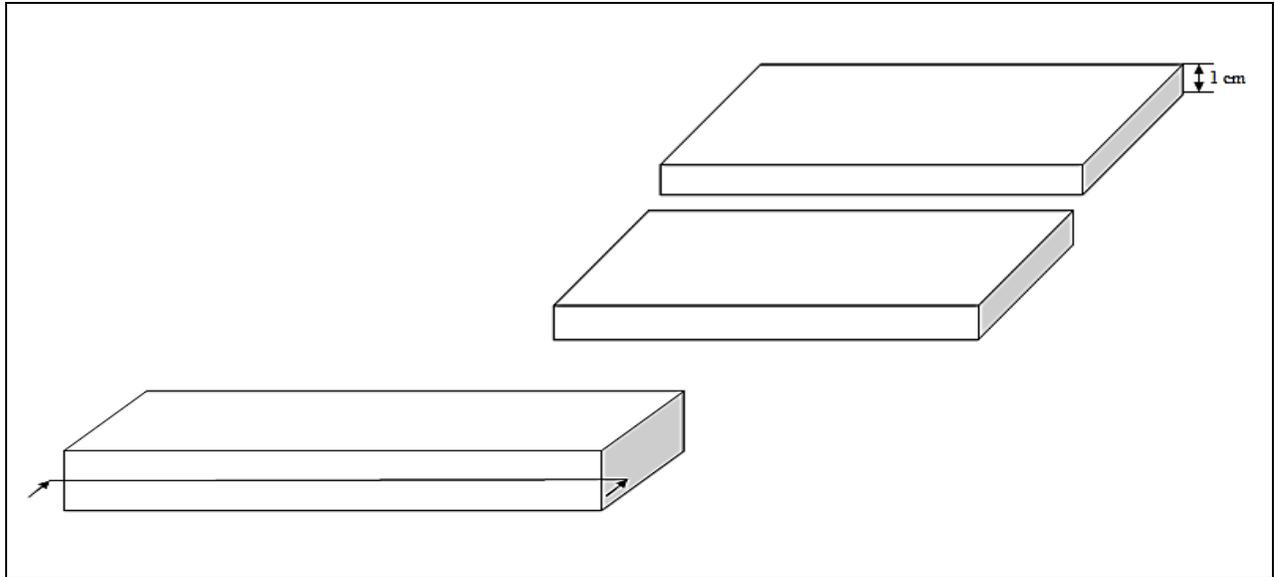


Figure.IV.2 découpage en deux du prisme

Etape 3

Une fois tous les parallélépipèdes découpés en deux, les moitiés sont usinées pour élaborer les éprouvettes utilisées dans nos essais de traction ; cet usinage s'est fait au moyen d'une fraiseuse verticale (figure.IV.3).



Figure.IV.3 fraiseuse verticale

La fraiseuse est réglée comme suit :

Vitesse de coupe : $V_c = 710$ tr/min

Vitesse d'avance : $V_a = 80$ mm/min

Cette étape s'est déroulée comme suit :

a) Surfaçage et fraisage en bout :

On monte sur la fraiseuse une fraise deux tailles de diamètre $\Phi = 50$ mm

Une fois la pièce montée sur la table de la fraiseuse, et après avoir respecté les paramètres et les conditions de coupe appropriés à l'usinage des matières plastiques, on lance l'opération de surfaçage afin d'obtenir des éprouvettes aux dimensions répondant à la norme ESIS qui stipule que pour avoir un *état de contrainte plane* dans le ligament, il faut que les dimensions des éprouvettes respectent la double condition suivante :

$$3B \leq l \leq \frac{W}{3}$$

IV.1 [26]

Ainsi on obtient des plaques aux dimensions de la (figure.IV.4)

$$l = 150 \text{ mm} ; \quad B = 6 \text{ mm} ; \quad W = 45 \text{ mm}.$$

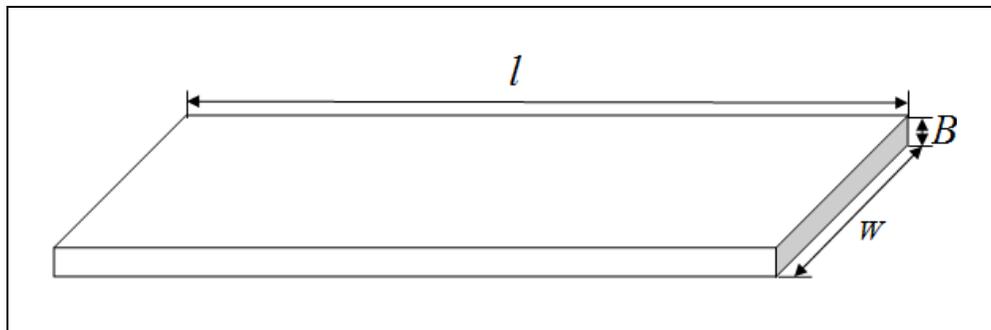


Figure.IV.4 dimensions des éprouvettes sans entaille de l'essai de traction réalisé

b) Réalisation d'entailles circulaires

La réalisation des différents rayons de courbure s'est effectué à l'aide d'un montage intermédiaire, pour faciliter l'usinage des rayons de courbure sur le côté profil de l'éprouvette ; (*figure.IV.5*).

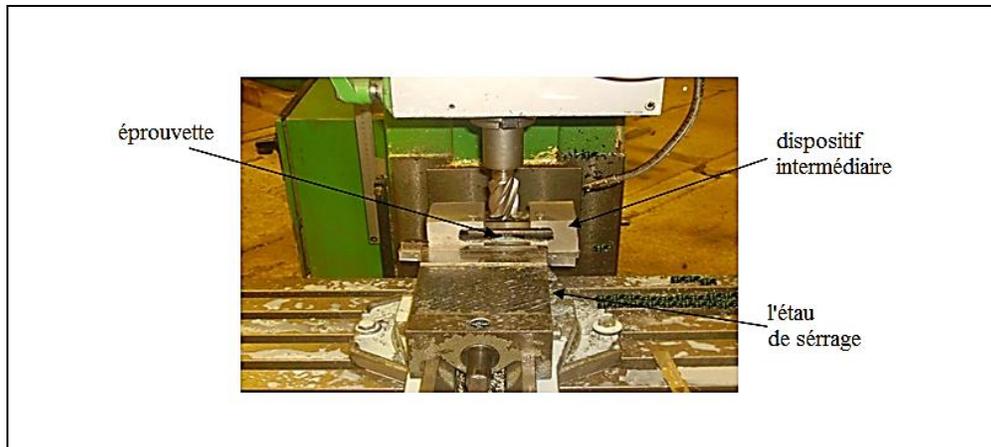


Figure.IV.5 Réalisation des rayons de courbure

Il faut souligner que dans la littérature il est recommandé d'utiliser de l'air comprimé en guise de lubrifiant, dans le but de refroidir le contact pièce-outil ainsi donc diminuer la concentration de contraintes en surface, et vue la non disponibilité de ce type de lubrification, un lubrifiant à base d'huiles hydrocarbures est utilisé.

Une fois que les étapes susdites sont terminées on obtient des plaques aux géométries similaires à la (*figure.IV.6*), et dont les dimensions sont regroupées dans le *tableau.IV.1*.

Les entailles de réparation sont réalisées dans le sens de l'extrusion.

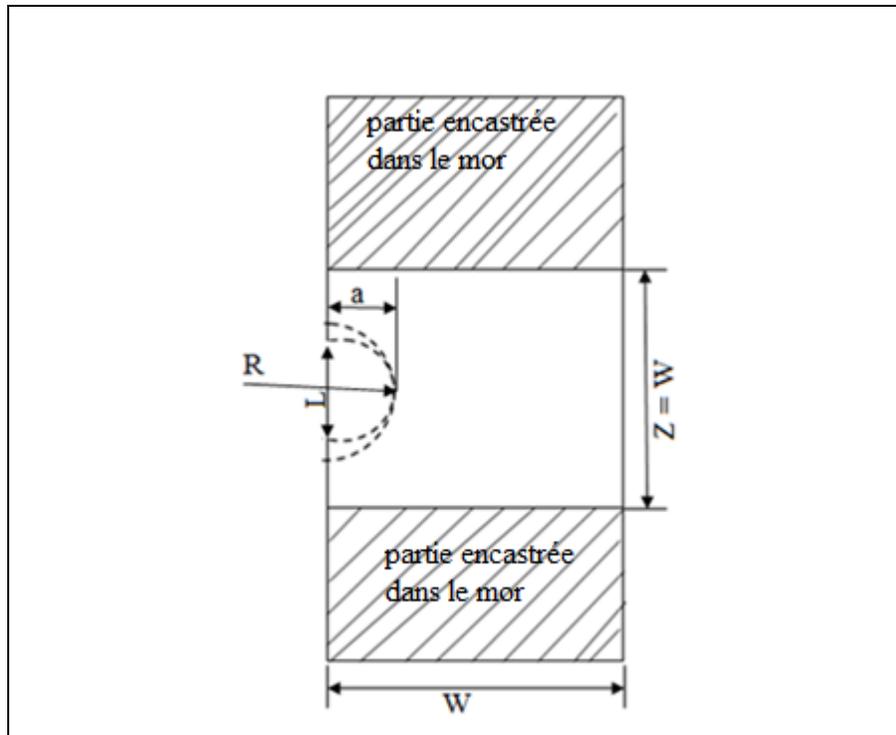


Figure.IV.6 forme générale des éprouvettes de traction.

Nombre d'éprouvettes	a [mm]	R [mm]	L [mm]	W [mm]
3	5	5	10.00	45
3	5	10	17.32	45
3	5	30	33.17	45
3	10	5	10.00	45
3	10	10	20.00	45
3	10	25	40.00	45
3	15	5	10.00	45
3	15	25	45.83	45
3	20	25	48.99	45
3	20	30	56.57	45
3	20	40	69.28	45
3	25	25	50.00	45
3	25	30	59.16	45
3	25	40	74.16	45

Tableau.IV.1 dimensions des éprouvettes

IV.3 . Essai de traction

IV.3.1 . Machine d'essais de traction

Pour l'exécution des essais de traction, nous avons utilisé la machine de traction IBERTEST qui se trouve au niveau du laboratoire de Génie Civil, faculté de Génie de la construction (UMMTO), (*figure.IV.7*).

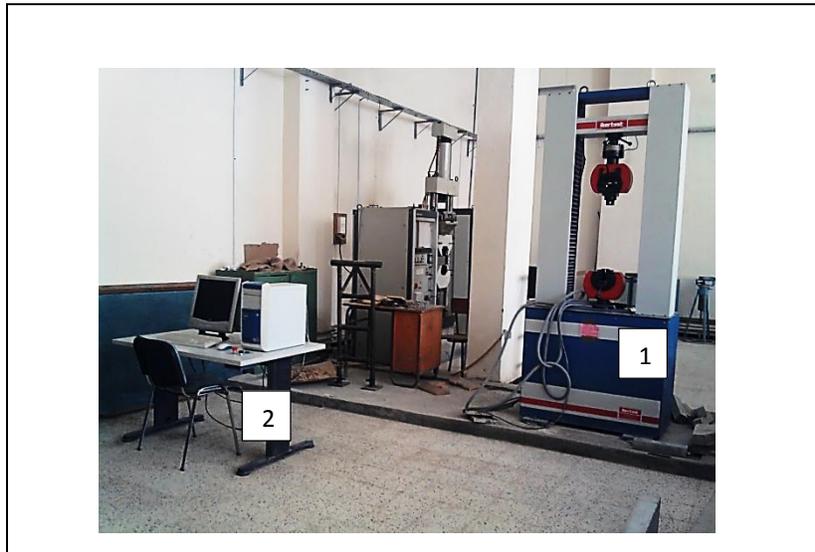


Figure.IV.7 Machine de traction et de compression

Cette machine universelle d'essai IBERTEST mode UIB-100/W permet d'exécuter des essais de traction, compression, flexion, pliage, cisaillement, dureté, etc...

Sa capacité est de 200KN, en traction et compression, les forces d'essais sont exécutées par une vis tournante qui provoque des sollicitations de traction en montant.

L'installation est composée de trois parties :

- 1 : Bâti d'essais ;
- 2 : Système de contrôle et d'acquisition des données.

IV.3.2. Exécution des essais de compression et de traction

Après la mise en marche de la machine de traction qui est reliée à un ordinateur et à l'aide d'un logiciel (WINTEST) on a saisi les informations, telles que :

- La vitesse de chargement : 10 mm/min pour toutes les éprouvettes.
- Les dimensions de l'éprouvette.

- La température ambiante 25°C.

On place l'éprouvette entre les mors de la machine en prenant soin d'aligner l'axe longitudinal de l'éprouvette avec l'axe de la machine d'essai.

Une fois l'éprouvette est placée, on effectue un déplacement de la travée qui a pour effet d'étirer l'éprouvette, le mouvement se fait par un système vis tournante.

Après la rupture de l'éprouvette Le logiciel WINTTEST nous fourni directement le diagramme représentant l'évolution de la force en fonction du déplacement (Force (KN)/Course (mm))

IV-4. Résultats des essais

Les résultats des essais sont représentés sur les figures suivantes, sur lesquelles on relève la charge maximale et calculé par une méthode numérique (méthode des trapèzes sous le code calcul MATLAB), l'énergie de déformation (W_r) qui est l'aire sous la courbe de traction. Dans ces courbes (a) représente la profondeur de l'entaille et (R) le rayon de la fraise.

La (*figure.IV.8*) est présentée ici dans le but de relever les caractéristiques mécaniques (via la courbe contrainte-déformation (*figure.IV.9*)) du matériau étudié et vérifier son comportement mécanique .

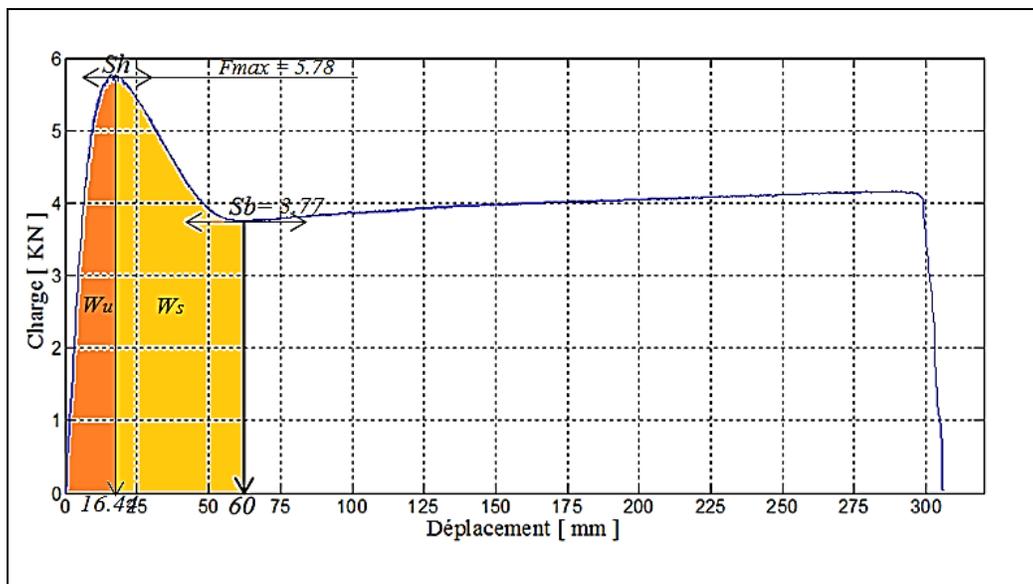


Figure.IV.8 Courbe charge-Déplacement de l'éprouvette sans entaille

La (*figure.IV.8*) est la courbe type d'un matériau ductile avec seuil d'écoulement.

Un grand nombre de matières thermoplastiques tel que les polyéthylènes, présentent ce type de comportement au voisinage de la température ambiante [27]:

- le **seuil d'écoulement haut** (S_h) qui correspond à la charge maximale (F_{max}). Il désigne l'apparition du phénomène de striction. *Une réduction de section pouvant aller jusqu'à 1/3 pour les matériaux semi-cristallins.*
- **seuil d'écoulement bas** (S_b) et à charge quasiment constante et la striction se propage sur toute la longueur de l'éprouvettes, avant d'atteindre la rupture pour des allongements pouvant atteindre 1000 % (dans notre cas c'est 650 % d'allongement avant rupture, voir (*figure.IV.9*)).

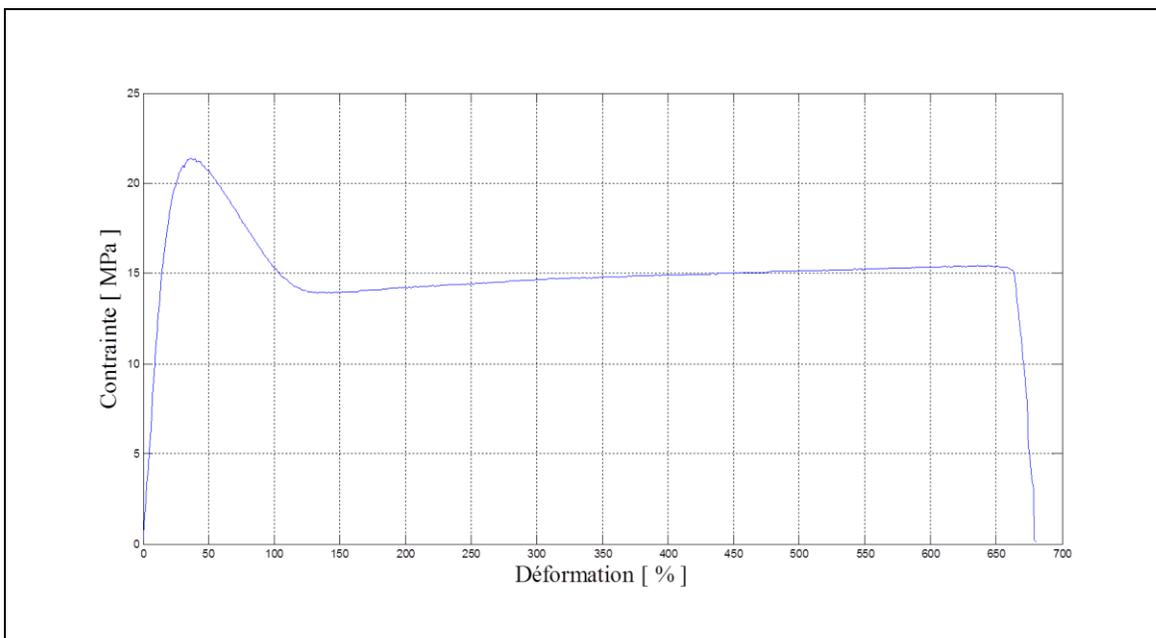


Figure.IV.9 courbe contrainte-déformation pour l'éprouvette sans entaille

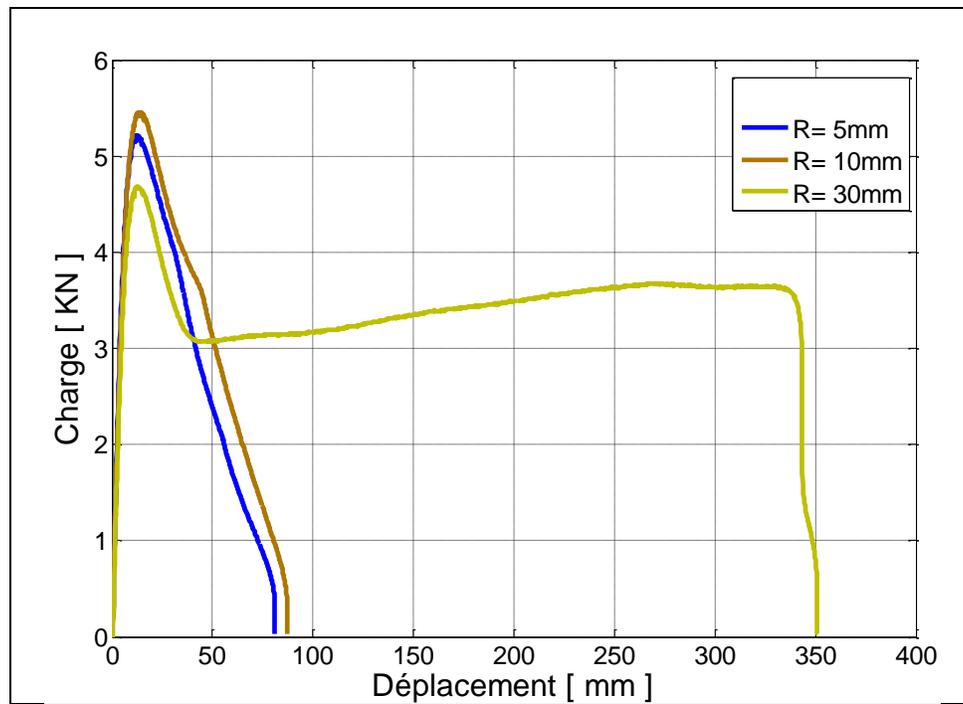


Figure.IV.10 Courbes charge-déplacement pour $a = 5\text{ mm}$

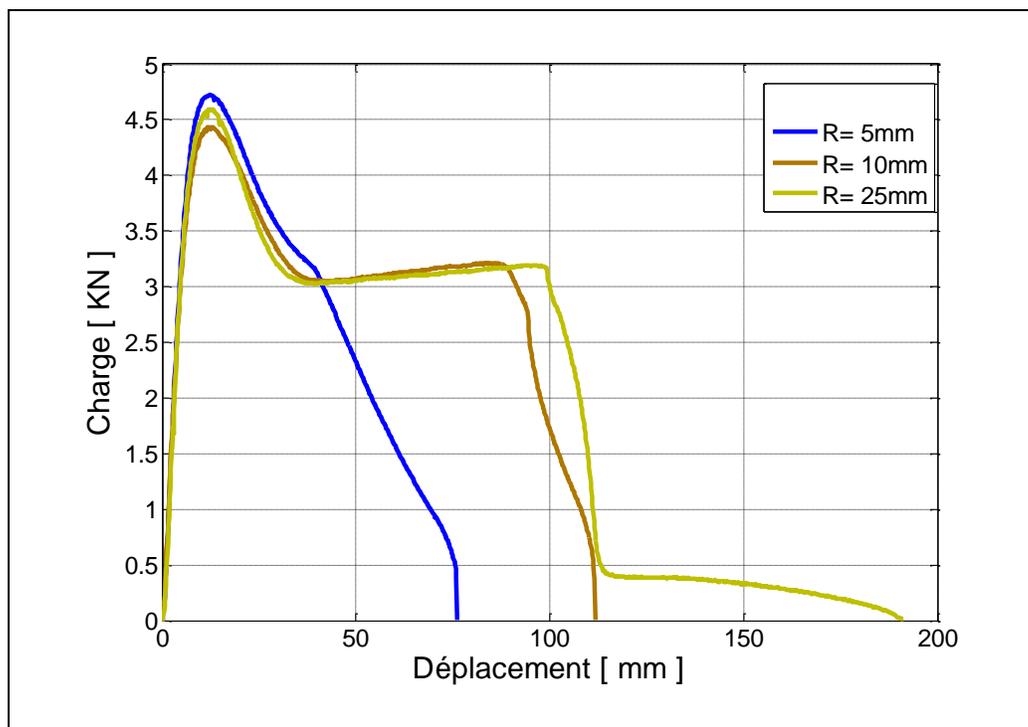


Figure.IV.11 courbes charge-déplacement pour $a = 10\text{ mm}$

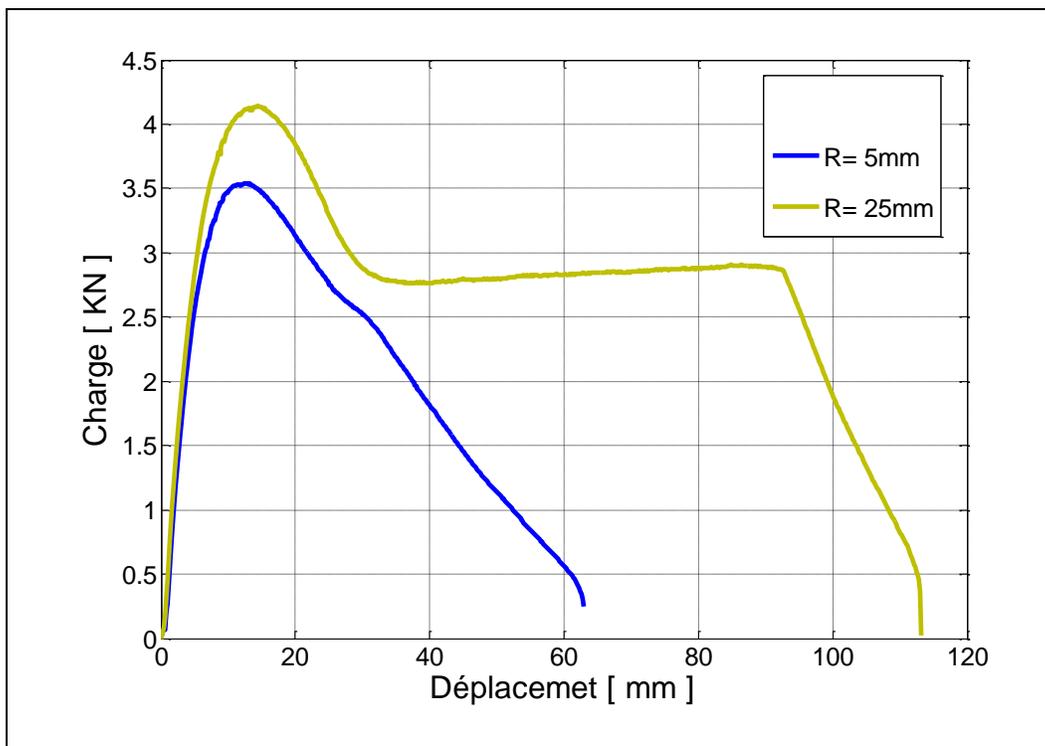


Figure.IV.12 courbes charge-déplacement pour $a = 15\text{mm}$

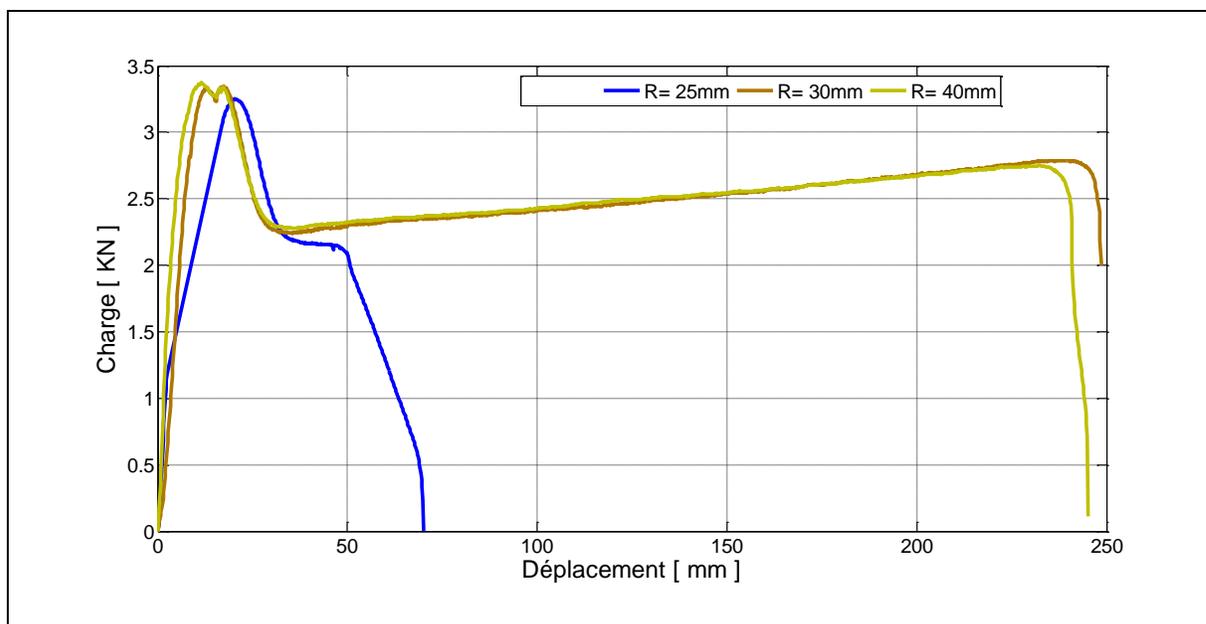


Figure.IV.13 courbes charge-déplacement pour $a = 20\text{mm}$

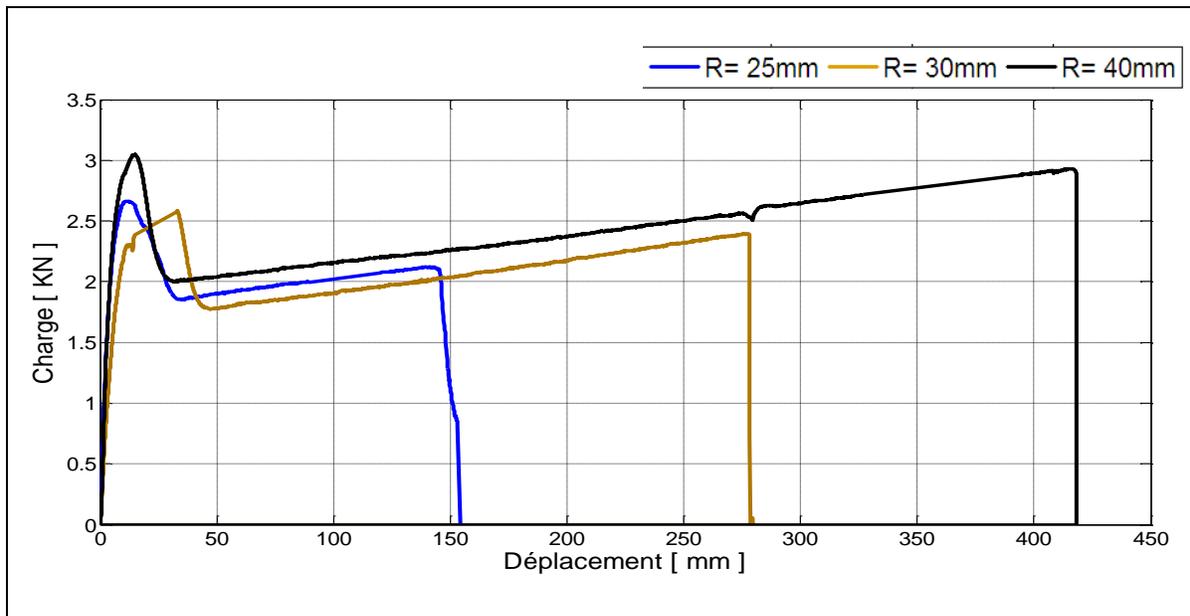


Figure.IV.14 courbes charge-déplacement pour $a = 25\text{mm}$

Des courbes précédentes on relève pour chaque longueur d'entaille et rayon de réparation la charge maximal ainsi que la valeur de l'aire sous la courbe de traction leur correspondant ces valeur sont regroupées dans le (tableau IV.20)

a [mm]	R [mm]	W_r [J]	F_{max} [KN]
5	5	235.12	5.22
	10	274.78	5.46
	30	1192.50	4.69
10	5	210	4.73
	10	333.52	4.45
	25	373.91	4.60
15	5	130.56	3.54
	25	309.40	4.14
20	25	140.05	3.25
	30	625	3.35
	40	617	3.37
25	25	306.58	2.7
	30	580.57	2.58
	40	1022.1	3.05

Tableau IV.2 valeurs de F_{max} et W_r

Pour chaque longueur d'entaille considérée on remarque que l'énergie plastique dissipée augmente proportionnellement au rayon de meulage, autrement dit plus le rayon de meulage est important, meilleur est la réparation.

IV.4.1. Analyse et discussion des résultats expérimentaux

Pour mieux cerner l'influence de la réparation des entailles par la méthode du meulage, différents types de courbes ont été tracées, En plus des courbes charge déplacement qui nous renseignent sur la charge maximale atteinte et l'énergie de déformation à la rupture de chaque type d'éprouvette. Sur lesquelles on peut remarquer une diminution de la charge maximale quand la profondeur (a) augmente, et une augmentation de l'énergie de déformation quand le rayon de meulage augmente à une profondeur constante.

Les résultats présentés ne nous permettent pas de porter un jugement sur l'influence du meulage sur la réparation des échantillons de PEHD, car sur les courbes de réparation des entailles (a) = 5mm et (a) = 10mm l'évolution de la charge maximale est aléatoire, sur les entailles (a) = 15 mm, 20 mm et 25 mm ; l'évolution de la charge maximale est croissante.

En conclusion on peut dire que le meulage à une influence positive sur les performances mécaniques. Pour donner un sens mathématique à cette observation nous estimons le facteur de concentration de contrainte par deux méthodes : une méthode analytique, et une méthode numérique basée sur les éléments finis et qui est développée dans la partie simulation numérique.

1) Méthode analytique

a) Estimations de K_t par la méthode d'Inglis

Le facteur de concentration de contrainte K_t des entailles engendrées par le perçage d'un trou de rayon R en fond de la fissure est estimé par Inglis [24]

$$K_t = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{R}} \quad \text{IV.2}$$

b) Estimation de K_t par la méthode de Creager & Paris

Creager et Paris ont proposé en 1967 une technique puissante pour estimer le K_t d'entaille à partir du facteur d'intensité de contrainte K_I

$$K_t \cong \frac{2K_I}{\sigma_n \sqrt{\pi R}} \quad \text{IV.3}$$

Avec

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \left[1.99 \left(\frac{a}{W} \right)^{0.5} - 0.41 \left(\frac{a}{W} \right)^{1.5} + 18.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{2.5} - 38.85 \left(\frac{a}{W} \right)^{3.5} + 53.85 \left(\frac{a}{W} \right)^{4.5} \right]$$

Avec (a) : est la profondeur d'entaille considérée ; (R) est le rayon de réparation ; (W) est la largeur de l'éprouvette (W=45mm) ; (B) est l'épaisseur d'éprouvette (B=6mm) ; Et P c'est la charge appliquée. Dans nos calculs on prend $P = F_{\max}$ relevée sur les courbes charge-déplacement.

σ_n : La contrainte nominale est prise quant à elle directement des courbes contrainte-déformation, elle est la contrainte au seuil d'écoulement plastique.

Les résultats de ces deux estimations sont représentés sur les (figures.IV.15a et IV.15b)

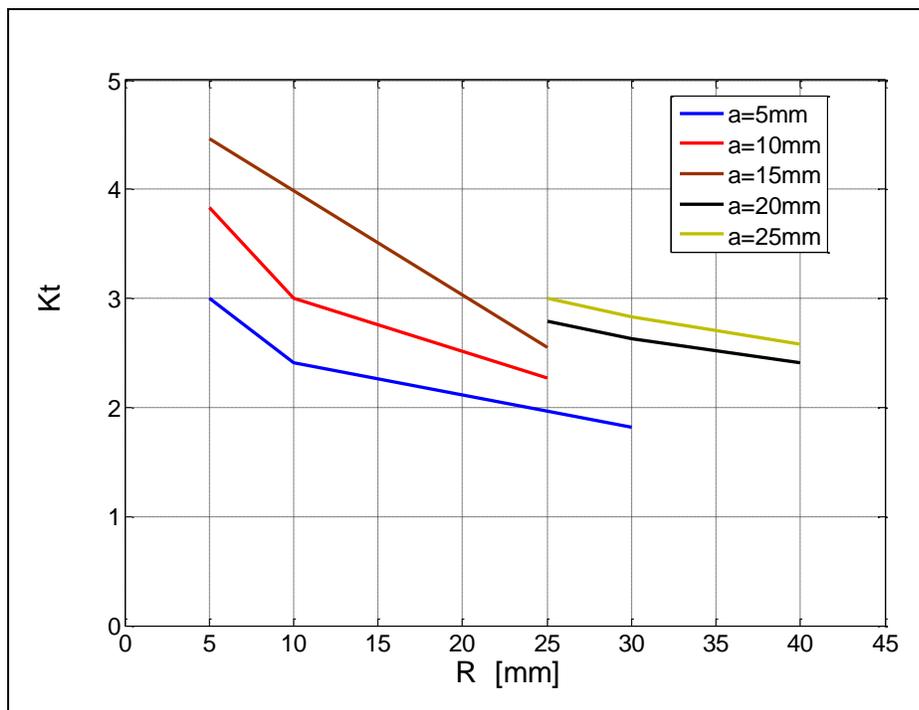


Figure.IV.15a estimation du facteur de concentration de contrainte méthode d'Inglis

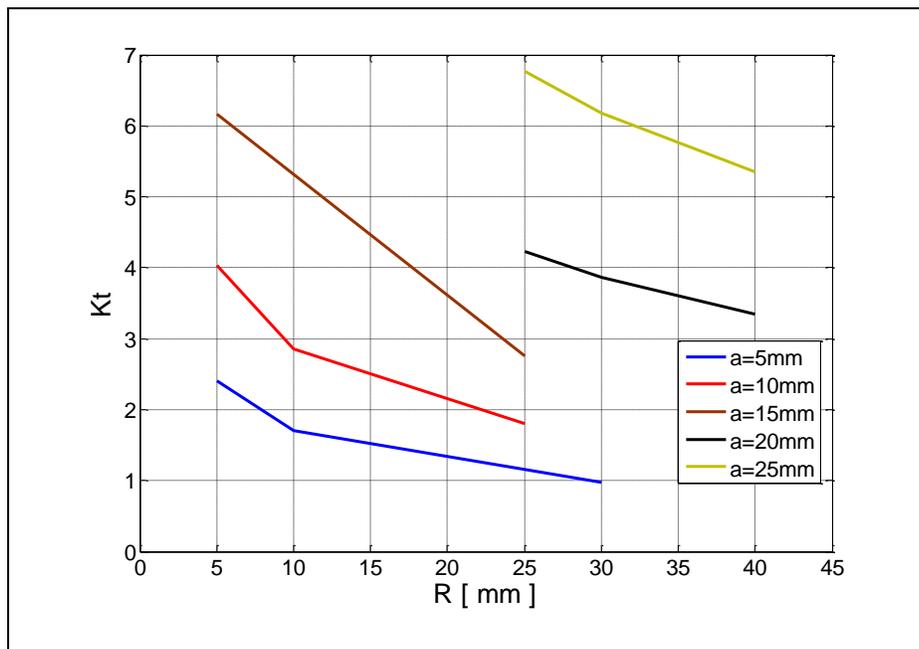


Figure.IV.15b estimation du facteur de concentration de contrainte méthode de Creager et Paris

Les (*figures.IV.15a et IV.15b*) montre qu'à une valeur de (a) constante, plus on augmente le rayon d'usinage ou de meulage plus le facteur de concentration de contrainte diminue, ce qui augmente la durée de vie résiduelle des éprouvette .

IV.4.2. Optimisation de la réparation

Dans le but de déterminer à quelle profondeur d'entaille et rayon du meulage la réparation pourrait être optimale, et en raison de la dispersion des résultats expérimentaux obtenus. Nous prenons en considération la déformation longitudinale à laquelle la striction est supposée stabilisée sur l'éprouvette sans entaille (au seuil d'écoulement bas S_b). Pour chaque courbe ainsi obtenue nous évaluons l'énergie nécessaire pour atteindre une déformation de 133 % correspondant à une élongation de 60 mm, comme indiquer sur la (*figure IV.16*)

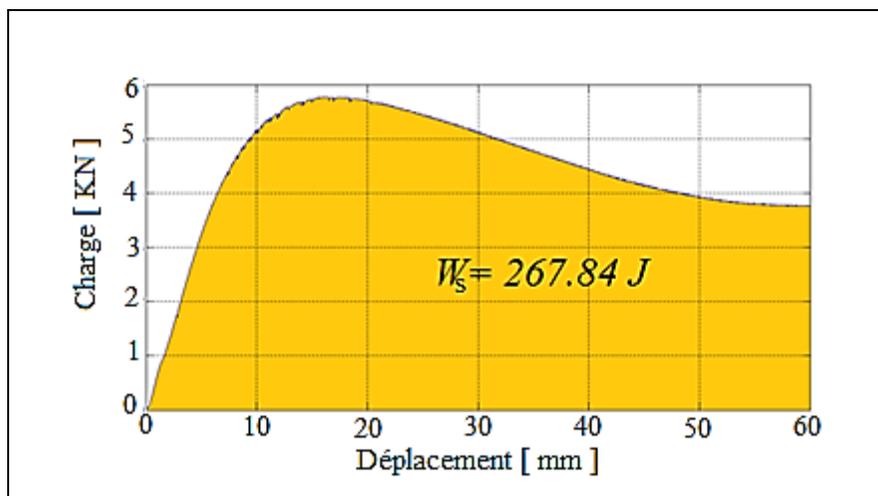


Figure.IV.16 courbe charge déplacement normalisée de l'éprouvette sans entaille

Les valeurs obtenues sont regroupées dans le *tableau.IV.3* telles que la profondeur d'entaille (a), le rayon de réparation (R), l'énergie nécessaire à la formation de la striction (W_s) et la charge maximale (Fmax)

A [mm]	R [mm]	L [mm]	W_s [J]	F_{max} [KN]	erreur relative de W_s [%]	Erreur relative de F_{max} [%]
00	00	0.00	267.84	5.78	0,00	0,00
05	30	33.17	207.41	4.69	22,56	18,86
10	10	20.00	200.11	4.45	25,29	23,01
10	25	40.00	210.13	4.60	21,55	20,42
15	25	45.83	182.77	4.14	31,76	28,37
20	30	56.57	143.45	3.35	46,44	42,04
20	40	69.28	150.89	3.37	43,66	41,70
25	25	50.00	122.83	2.7	54,14	53,29
25	40	74.16	131.60	3.05	50,87	47,23

Tableau.IV.3 éléments d'optimisation

Dans le tableau IV.3, on remarque que plus le rayon de réparation est important plus la réparation est efficace. Pour la détection des valeurs géométriques optimales de réparation nous avons tracé la courbe de variation de F_{max} en fonction de a/W , illustrée sur la (figure IV.17)

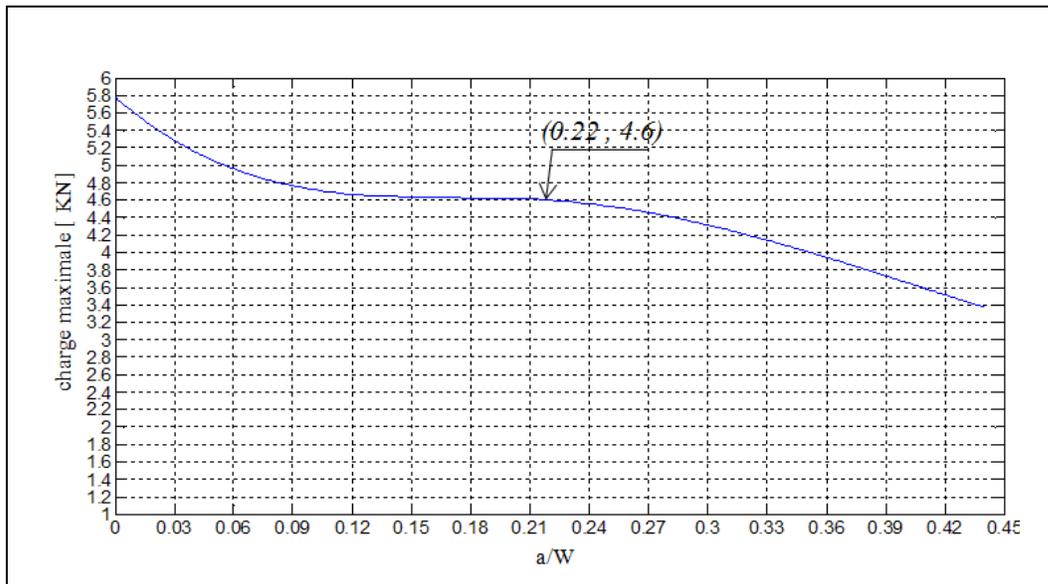


Figure.IV.17 variation de la charge maximale en fonction du rapport profondeur d'entaille-largeur d'éprouvette

La *figure.IV.17* montre que la charge maximale du matériau diminue de 5.78 KN pour un rapport de $\frac{a}{W} = 0$; jusqu'à une valeur de 4.6 KN correspondant à une valeur de $\frac{a}{W} = 0.15$ et se stabilise jusqu'à 0.22 ($a = 9.9$ mm), au-delà de cette valeur on remarque que la charge maximale subit une nouvelle rechute, qui par interpolation pourrait atteindre zéro au fur et à mesure que le rapport fond d'entaille-largeur d'éprouvette augmente à partir de 0.22 ; ce qui veut dire que la valeur optimale de réparation se situe au-dessous du rapport $\frac{a}{W} = 0.22$, au-delà la réparation n'est plus efficace.

CHAPITRE V
ETUDE
NUMERIQUE

V.1 Introduction

L'étude expérimentale réalisée au chapitre IV, nous a permis de décrire l'influence d'une réparation par meulage sur le comportement mécanique du PEHD ; on effectue une étude numérique pour compléter l'étude expérimentale en évaluant les valeurs de K_t par une méthode numérique.

Les résultats expérimentaux, caractérisant le PEHD, qui sont introduit dans le code de calcul COMSOL 3.5 sont ceux de la bibliographie.

V.2.Problème mécanique

V.2.1.description du problème

Considérant, pour des raisons de symétrie, un demi d'une plaque de dimensions finies similaires à celles de l'étude expérimentale ; cette plaque est maillée par un maillage quadratique régulier, qui est affiné le maillage au voisinage du rayon du meulage, comme indiquer sur (*figure.V.1*)

L'encadrer en couleur c'est la partie de la plaque avec laquelle la simulation est effectuée.

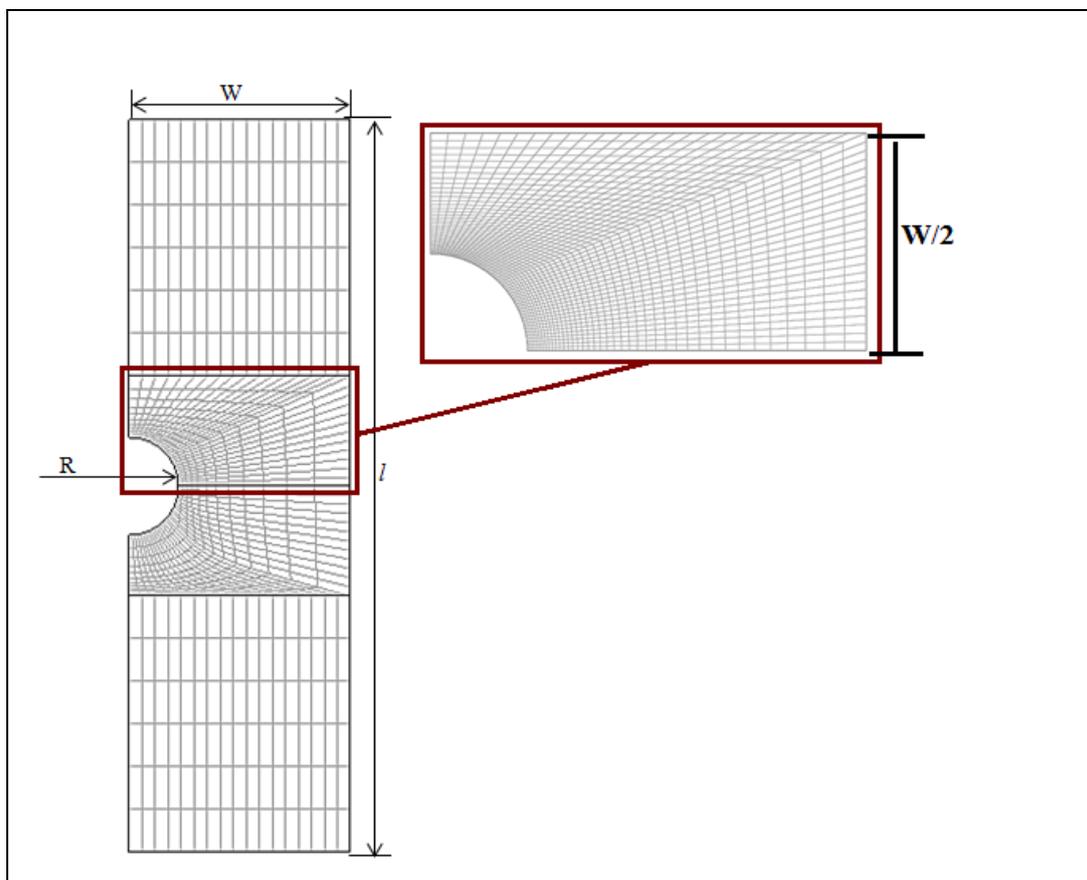


Figure.V.1 chargement et maillage de l'éprouvette de simulation

Pour analyser le comportement en traction du PEHD on choisit un mode d'analyse statique pour matériau élasto-plastique en contrainte plane.

Les propriétés du matériau, proposé par M^r Farhoum, sont :

$$\sigma_e = 22 \text{ MPa}$$

$$E = 800 \text{ MPa (module de Young)}$$

$$\nu = 0.30 \text{ (coefficient de poisson)}$$

Pour décrire la courbe d'écrouissage du PEHD, on choisit un mode de durcissement isotrope dans lequel on introduit la fonction d'écrouissage suivante :

$$\sigma_{yhard} = \sigma_{exp}(\varepsilon_{eff}) - \sigma_{ys} = \sigma_{exp}\left(\varepsilon_{pe} + \frac{\sigma_e}{E}\right) - \sigma_{ys} \quad V.1$$

Avec

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_{pe} + \frac{\sigma_e}{E} \quad V.2$$

σ_{exp} : Contrainte expérimentale

$\sigma_{ys} = \sigma_e$: limite d'élasticité

ε_{eff} : Déformation effective

ε_{pe} : Déformation plastique effective

On a choisi une analyse paramétrée, en paramétrant le chargement de 0 jusqu'à 10^4 N.

Les conditions aux limites de la simulation sont comme sur la (figure .V.2). Tel que sur l'arête n°3 on applique une condition de symétrie, sur l'arête n°2 on applique les conditions de chargement $F_y = \text{Load/Area}$ [voir annexe]

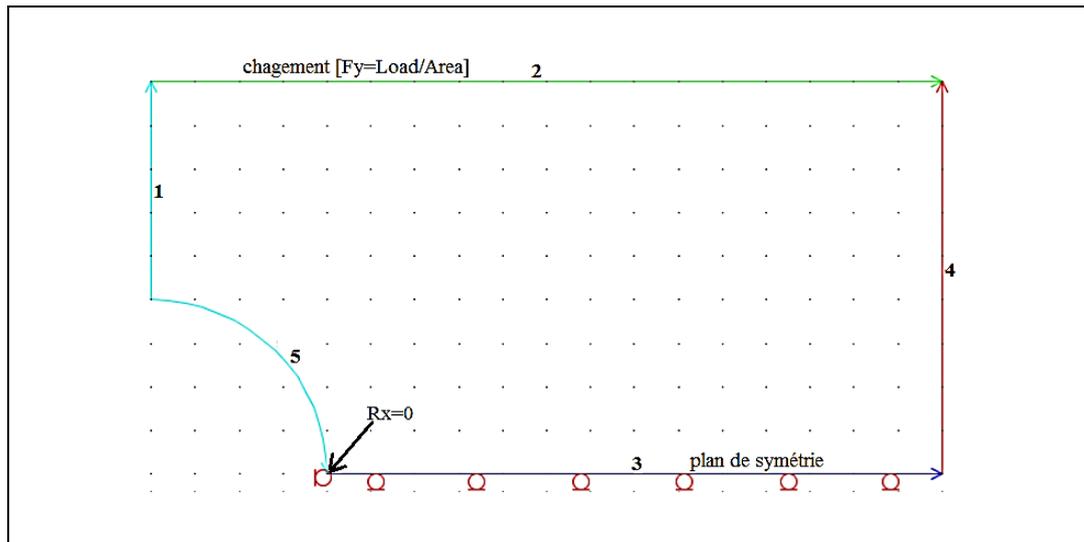


Figure V.2. Condition aux limites de la simulation.

V.3.Résultats de la simulation

Les résultats de la simulation sont regroupés dans les figures suivantes sous forme de :

- Courbes charge-déplacement pour voir l'influence de la profondeur d'entaille et du rayon de réparation sur le comportement mécanique du matériau ;
- Courbes contrainte équivalente de Von Mises-longueur du ligament pour analyser l'influence de la profondeur d'entaille et du rayon de réparation sur la distribution des contraintes le long du ligament ;
- Courbe facteur de concentration de contrainte-Rayon de réparation ;

Avant de présenter les résultats pris en considération, on a importé du code de calcul COMSOL 3.5 les courbes des figures (V.3 et V.4) ; Sur lesquelles on peut remarquer la reproductibilité du comportement global du PEHD. La (figure.V.3), est la courbe type contrainte-déformation du PEHD .

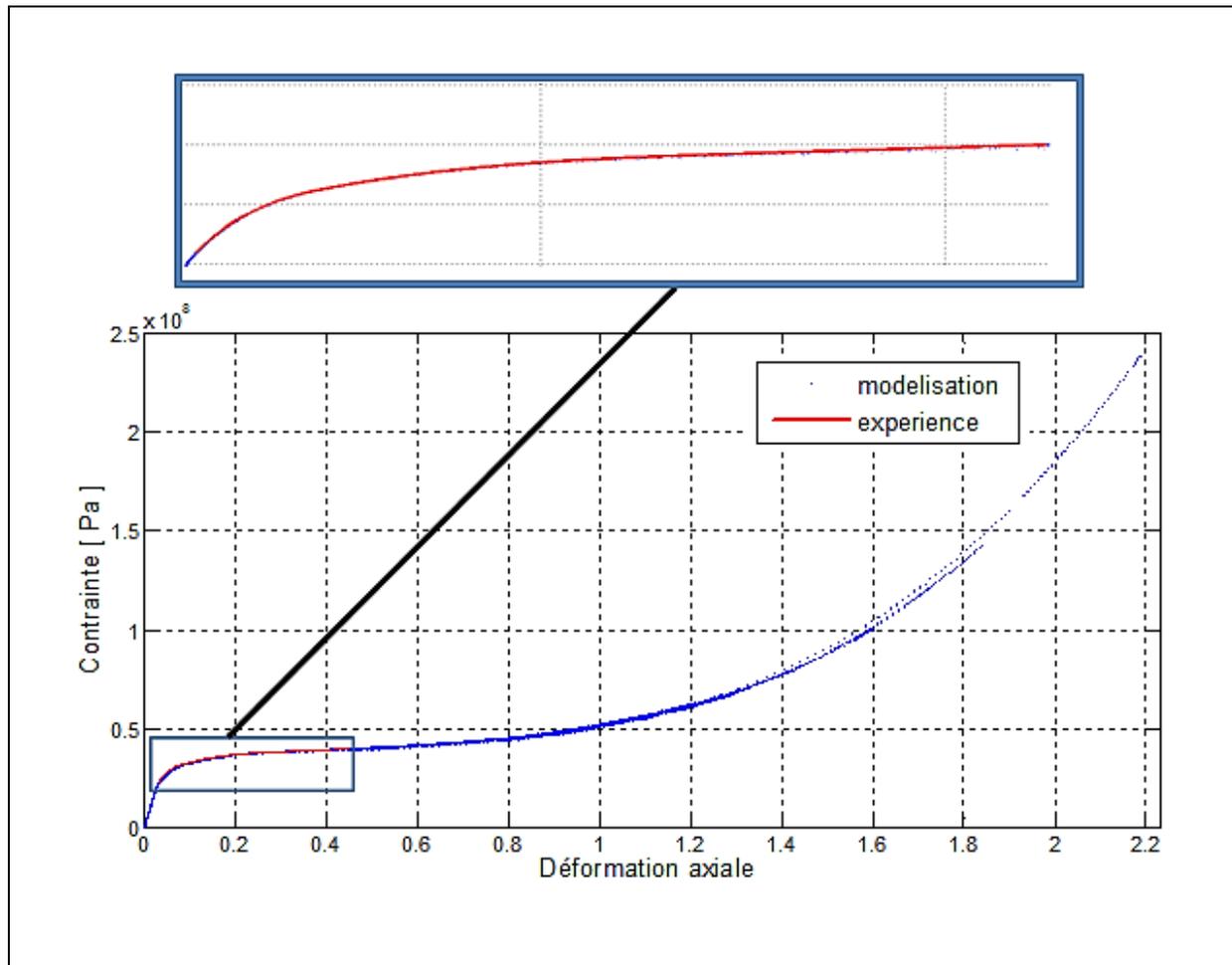


Figure .V.3. Contrainte de Von Mises en fonction de la déformation axiale

La courbe de la *figure V.3.* se confond à la courbe expérimentale. Avec une erreur de convergence allant de 10^{-5} à 10^{-14} , ce qui nous permet de valider l'exactitude des réglages de configuration effectuée dans l'interface du logiciel. Les réglages conservés, nous cherchons à connaître les limites du matériau modélisé, la (*figure.V.4*) montre la courbe charge déformation de l'essai sans entaille, et la (*figure V.5*) illustre le comportement global du PEHD à différentes profondeur d'entaille.

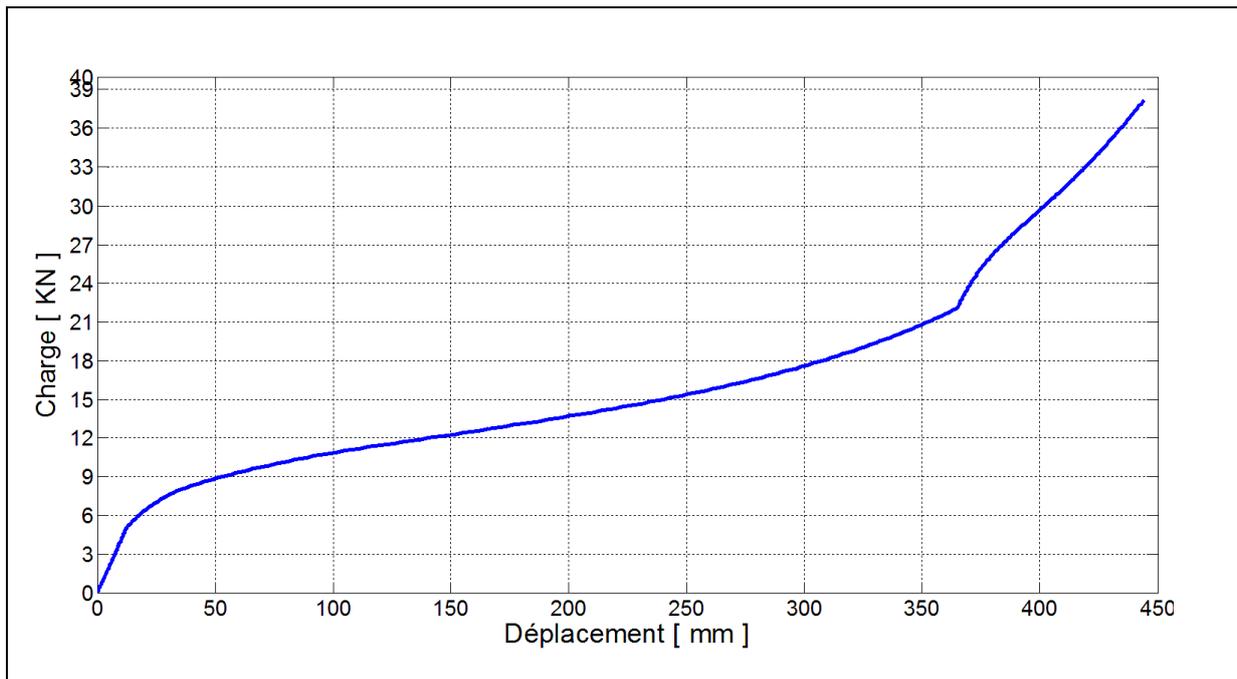


Figure V.4. Courbe charge déplacement du matériau sain

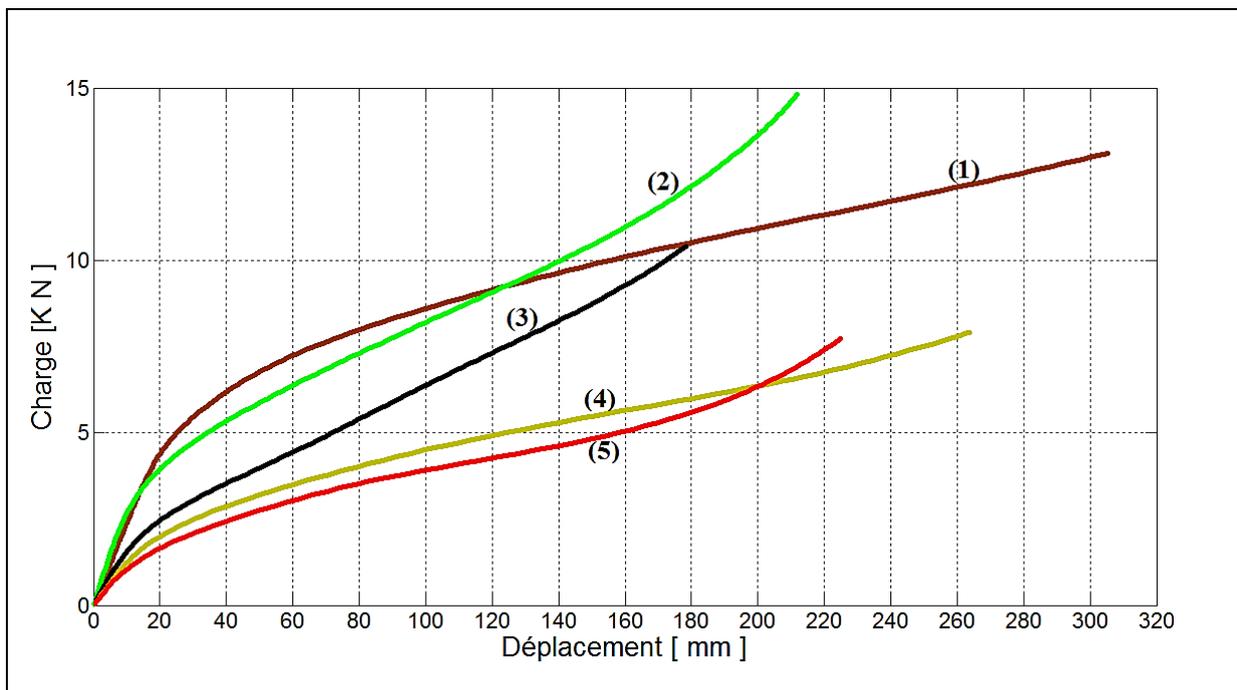


Figure V.5. Courbes comportement du PEHD aux entailles

(1): $a=5\text{mm}$, (2): $a=10\text{mm}$, (3): $a=15\text{mm}$, (4): $a=20\text{mm}$, (5): $a=25\text{mm}$.

Les résultats des réparations sont regroupés dans le tableau V.1 sous forme de valeurs de (a) : profondeur d'entaille, (a/W) : rapport profondeur d'entaille/ largeur d'éprouvette, charge maximale correspondant à la déformation plastique (F_p) et son erreur relative. Dans ce tableau F_{ref} : correspond à ($a=0$)

a [mm]	R [mm]	a/W	F_p [KN]	$\left \frac{F_{ref}-F_p}{F_{ref}} \right $ [%]
0	0	0	6.70	0.00
5	5	0.11	5.30	20.90
	10		5.00	25.37
	30		5.11	23.73
10	10	0.22	3.72	44.45
	25		3.88	42.09
15	5	0.33	2.10	68.66
	25		2.20	67.16
20	25	0.44	1.40	79.10
	30		2.00	70.15
	40		2.60	61.19
25	25	0.56	1.33	80.15
	30		1.50	77.62
	40		1.8	73.13

Tableau V.1. Evolution de F_p avec les dimensions de l'entaille

V.4.analyse des résultats

L'évolution des valeurs (F_p), montre que l'augmentation de « a » à partir de 10 mm de profondeur, fait affaiblir le matériau en réduisant son domaine d'élasticité et son écrouissage plastique devient d'avantage précipité au-delà de $a=10$ mm, pour $a=0$ $F_p = 6.7$ KN et $a= 25$ mm $F_p= 1.8$ KN avec une erreur relative de 73.13% , alors qu'à $a=10$ mm on remarque moins de 50% d'erreur , de ces valeurs et de l'évolution des courbes de la (*figure V.5*) on conclut qu'au-delà de 10mm de profondeur d'entaille la réparation n'est pas efficace.

Pour vérifier l'influence du rayon de réparation ; on calcule le facteur de concentration de contraintes K_t , par la relation III.20 (Tableau V.2), et traçons son évolution en fonction du rayon de réparation, (voire figure V.6). Dans le tableau $S_0 = 270 \text{ mm}^2$ c'est la section du ligament sans entaille.

F_p [KN]	$\sigma_n = F_p/S_0$ [MPa]	σ_{max} [MPa]	$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$
5.30	19.63	36.8	1.87
5.00	18.52	34.00	1.83
5.11	19.93	31.90	1.60
3.72	13.78	36.41	2.64
3.88	14.37	34.93	2.43
2.10	7.77	39.09	5.03
2.20	8.15	31.99	3.92
1.40	5.18	31.01	5.98
2.00	7.40	31.83	4.30
2.60	9.63	31.34	3.25
1.33	4.93	34.38	6.97
1.50	5.56	32.90	5.91
1.8	6.67	30.92	4.63

Tableau V.2 éléments de calcul du facteur de concentration de contrainte K_t

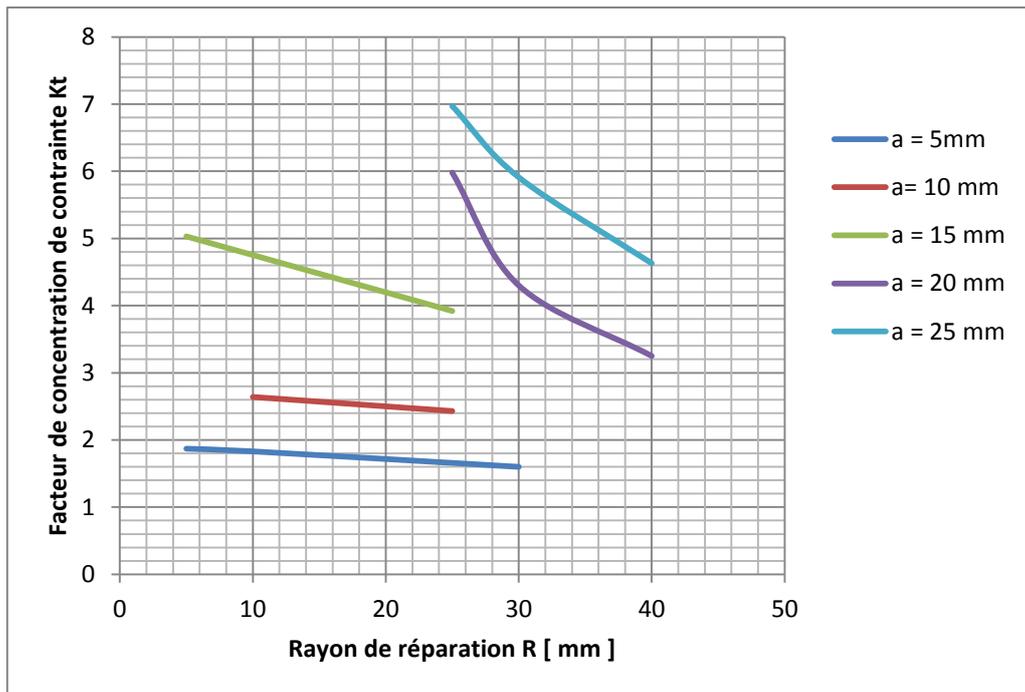


Figure V.6. Variation du facteur de concentration de contrainte en fonction de R

Sur la (*figure V.6*) on remarque que K_t augmente avec la profondeur d'entaille et il est inversement proportionnel au rayon de réparation.

Suivant la même démarche que dans le *chapitre. IV* nous traçons la courbes de la

(*figures V.7*) , on choisit du (*tableau V.1*) les valeurs de « Fp » les plus optimales fonction de la profondeur et du rayon de réparation et on trace avec la courbe d'optimisation .

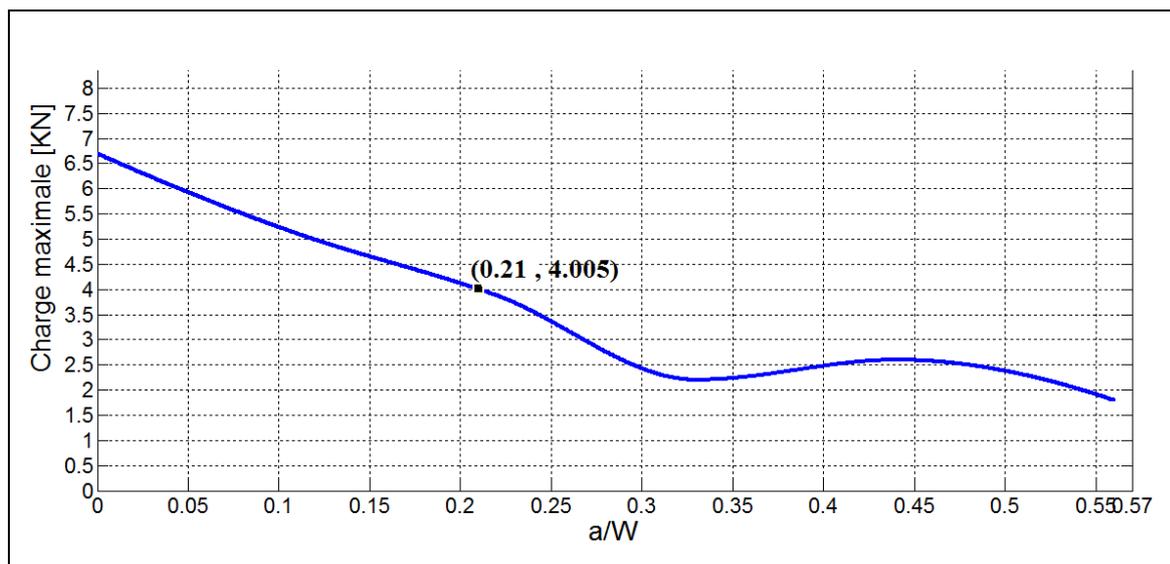


Figure.V.7. Variation de la charge maximale en fonction de a / W .

Sur la figure on relève les mêmes constatations que dans les figures (IV.17) ; le point d'inflexion au coordonnées $(0.21 ; 4.005)$ représente la valeur de $\frac{a}{W} = 0.21$ au-dessus de laquelle réparée la plaque en PEHD n'est plus efficace.

V.5. Comparaison des valeurs optimales

Les valeurs optimales de la réparation d'une plaque en PEHD entaillée, sont regroupées dans le *Tableau.V.3* ;

	a/W	F_{\max}/F_p [KN]
Expérience	0.22	4.6
Modélisation	0.21	4.005
Erreur relative [%]	4.55	12.93

Tableau V.3. Valeurs optimales de la réparation des plaques de PEHD entaillées par meulage.

L'erreur relative entre les résultats de la simulation et de l'expérience étant faible.

CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été consacrés, dans le premier chapitre à présenter d'une manière globale le monde des fissures et leurs réparations sur différents types de matériaux, la multitude de paramètres dont il faut tenir compte notamment le type du matériau constituant la structure, ses conditions de service pour les matériaux métalliques qui le plus souvent exige une réparation par soudure ce qui nécessite pour l'opérateur d'avoir de bonne notion de métallurgie. Une bonne évaluation du type de fissure et son origine conduit au choix d'une méthode de réparation rentable en termes de coût et d'efficacité. En plus des patches et des colles, réparer des fissures et en voie de devenir le travail du matériau lui-même par la mise en œuvre de matériaux susceptible de se réparer eux même par le principe de la chimie supramoléculaire, qui exploite les caractéristiques des liaisons physique dans les matériaux plastiques.

Dans le deuxième chapitre l'idée est portée sur les différents modes d'endommagement des pipes selon les matériaux les constituants, exemple de la corrosion pour les tubes en aciers, les éraflures, écorchures et inclusions pour les plastiques, particulièrement le PEHD. Les méthodes de réparation lesquelles traitent dans l'ensemble de la réparation des tubes en acier. Quant aux tubes en PEHD considérés comme étant des tubes infailibles sont utilisés pour compléter une des techniques de remplacement des canalisations sans effectuer de grands travaux d'excavation.

La vulnérabilité des tubes PEHD aux défauts sus cités étant prouvée une problématique est soulevée : peut-on éliminer la singularité des contraintes présentent sur les tubes PEHD par la technique de meulage ?

La réponse à cette question débute avec le chapitre trois qui fait une présentation du polyéthylène, son mode d'élaboration, l'influence de son taux de cristallinité sur son comportement mécanique et son comportement à l'entaille

La réparation des fissures modification géométrique et les outils fournis par la mécanique de la rupture pour analyser l'effet de la géométrie de l'entaille sur la répartition des contraintes en fond de celle –ci.

L'étude menée dans le chapitre quatre a révélé que le comportement des éprouvettes en PEHD en traction est influencé par la profondeur de l'entaille et le rayon de celle-ci. Les résultats mettent en évidence une diminution de la charge maximale au fur et à mesure que la profondeur de l'entaille augmente elle est passée de 5.78 KN pour une éprouvette saine à 2.53 KN pour $a = 25$ mm.

à répertorier les différentes méthodes de réparation des structures présentant une discontinuité géométrique sur leurs surfaces comme dans leurs volumes. Et à l'étude de la réparation des fissures, par la technique de meulage de ces dernières, fréquemment utilisée pour augmenter la durée de vie de ces structures.

L'influence de cette méthode de réparation sur le polyéthylène haute densité a été étudiée par une analyse expérimentale et modélisation numérique. Par ces deux approches on a constaté que la réparation par modification géométrique des dimensions de l'entaille, a une influence positive sur le comportement mécanique du matériau étudié.

En effet, le meulage réalisé sur les plaques entaillées en polyéthylène haute densité et la variation du rayon de courbure introduit pour le modèle de simulation, conduisent à une diminution du phénomène de concentration de contrainte au fond du défaut, et à la restitution d'une partie des performances du PEHD.

Dans cette étude, l'ensemble « entaille + rayon de réparation » a été considéré comme étant une entaille semi-elliptique ce qui introduit un changement dans la façon de considérer les effets de la réparation :

- Evaluation du facteur de concentration de contrainte élastique K_t par la méthode d'Inglis, la méthode de Creager & Paris.

Les résultats numériques ont été comparés aux résultats expérimentaux, globalement les deux approches nous fournissent des valeurs de K_t et $\frac{a}{W}$, respectivement voisinent [0.21-0.22] pour lesquelles la réparation par meulage est optimale.

PERSPECTIVES

En perspective à ce travail, nous proposons les pistes de recherche suivantes :

- Etudier la conception et la réalisation d'un dispositif de réparation par meulage pour Tubes de PEHD entaillés par griffure.
- Etudier l'influence du meulage sur la résistance à la fissuration sous contrainte (pression interne) des tubes en PEHD entaillés.
- Modélisation de la réparation des tubes en Polyéthylène haute densité présentant des entailles dues à des griffures pour différents scénarios de sollicitation.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

[3] : **Jean-Denis MATHIAS**

« *Etude du comportement mécanique de patchs composites utilisés pour le renforcement de structures métalliques aéronautiques* »

N° d'ordre : D.U. 1587 ; EDSPIC : 323

Université BLAISE PASCAL - Clermont II ; Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Clermont-Ferrand

[5] : **A. Périchaud, W. Ballout, D. Donescu, C. Nistor et M.J-M. Abadie**

« *Traitements de surface auto cicatrisants pour applications spatiales : cas des panneaux solaires* »

Chemical Bulletin of "Politehnica" University of Timisoara, ROMANIA

Series of Chemistry and Environmental Engineering

Volume 54(68), 2, 2009

[7] : **A. BELALIA, M. ABERKANE, Z. AZARI** « *la réhabilitation des canalisations de transport endommagées* ».

Rapport : egide, cmep-tassili (**CMEP 07 MDU 720**)

[8]: **Fateh AGGOUNE** « *évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation* » Université MENTOURI Constantine

[10]: **A.TABERKOKT** « *réhabilitation du gazoduc Φ 20* » RELIZANE – MAGHNIA ; sonelgaz-xg, ALGERIA

[13] : **Mustapha ALLOUTI** « *Étude de la nocivité de défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaisons* » **Université Paul Verlaine de Metz, France.**

[16]: **Chapter 11** « *Pipeline Rehabilitation by Sliplining with Polyethylene Pipe* »

<http://plasticpipe.org/pdf/chapter11.pdf>

[17] : **A. Benhamena,, L. Aminallah, B. BachirBouiadjra , M. Benguediab , A.Amrouche , N. Benseddiq** « *J integral solution for semi-elliptical surface crack in high density poly-ethylenepipe under bending* »

Materials and Design 32 (2011) 2561–2569

[18]: **R. Schouwenaars, V.H. Jacobo, E. Ramos, A. Ortiz**

« *Slow crack growth and failure induced by manufacturing defects in HDPE-tubes* »

Engineering Failure Analysis 14 (2007) 1124–1134

[20] : **J-P.Bailon ; J-M.Dorlot** : « *Des Matériaux* »

[21] : **J.L.Halary ; F.Laupretre ; L.Monnerie** « Mécanique des matériaux polymères ».édition **Belin, 2008**

[22]: **J. CAZENAVE** « Sur le compromis rigidité/durabilité du polyéthylène Haute Densité en relation avec la structure de chaîne, la microstructure et la topologie moléculaire issues de la cristallisation » ; N° d'ordre **2005ISAL0030**; École doctorale **matériaux de Lyon.**

[23] : « *Polyéthylène haute densité PE-HD* » par **Reynald DOSSOGNE**

Techniques de l'Ingénieur, traité **Plastiques et Composites A 3 315**

[24] : **Hao WU**, « *Modélisation de l'extension de la durée de vie des structures fissurées après réparation par la technique de perçage* », thèse de doctorat, **Université de Lille1; 2009.**

[25] : **Jian LU** et **Henri-Paul LIEURADE** « *Concentration de contraintes* »

Techniques de l'Ingénieur, traité **Génie mécanique, BM 5 040.**

[26] : **M.Aberkane**, « *étude sur la rupture ductile des tôles minces* » thèse de doctorat de l'Université **Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.**

[27] : **P. KRAWCZAK** « *Essais mécaniques des plastiques ; Caractéristiques instantanées* » ; **Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites AM 3 510.**

[28] : **F.CHECOT** ; « *Ingénierie Macromoléculaire par Auto-assemblage : formation, manipulation et pérennisation de nano-matériaux et nano-objets à base de polypeptides* » ; thèse doctorat ; N° ordre : **2742** ; université **bordeaux 1**

SITES INTERNET

[1] : **Guide n°1 [FAME]** « *Réparation et rénovation des structures métalliques* »

Une édition du syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures (strres) / **décembre 2008**.

<http://www.strres.org/pdf/FAME1.pdf>

[2] : « *Travaux de construction en acier* » - **Guide du Maître d'œuvre – SETRA 2001**

<http://www.strres.org/pdf/FAME1.pdf>

[4] : **Guide n°3 [FABEM]** « *Traitements des fissures par injection* »

<http://www.strres.org/pdf/guide02.pdf>

[6] : « *Détérioration et inspection des réseaux de distribution d'eau* » **Septembre 2002**

http://fmv.fcm.ca/files/Infraguide/Potable_Water/Deterior_Inspect_water_distribution_syst_fr.pdf

[9]: **PHMSA** « *Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration*

Mechanical damages »

<http://publicintelligence.net/pipeline-and-hazardous-materials-safety-administration-phmsa-gas-distribution-pipeline-safety-report/>

[11]: **Jong-hyunBaek, Woo-sik Kim*, Young-Pyo Kim**

« *Comparative study for various repair methods of in-service pipeline using full scale burst test* » Research and Development Division, Korea Gas Corporation, Ansan, 426-790, Korea

<http://www.igu.org/html/wgc2006/pdf/paper/add10092.pdf>

[12] : Produits_specifiques_reparation_fuite_corrosion_fissure_pipelines

www.3xengineering.com

[14] : « *manchon de réparation en acier inoxydable* » ; <http://www.huwa.com/tuv.html>

[15] : **M. Rameil** « *Handbook of Pipe Bursting Practice* »

http://www.nodig.de/doks/pdf/Read-Inside_Handbook_pipe-bursting-2007.pdf

[19] : **GLYNWED** Tubes PE dossiertechique

http://www.glynwed.fr/Docs/Documents/MASA_PE100_dossier.pdf

[27]: entreprise **STPM CHIALI** catalogue technique « *Tubes polyéthylènes (PE) et accessoires* »

<http://www.groupe-chiali.com/pdf/PEHD-Catalogue-technique.pdf>

ANNEXE

Le logiciel Comsol, anciennement appelé FEMLab, développé initialement comme une toolbox de Matlab, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement.

Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes Multiphysiques.

L'utilisation à ce logiciel n'exige pas une connaissance détaillée des mathématiques ou de l'analyse numérique. Grâce aux modes intégrés de physique il est possible d'établir des modèles en définissant les quantités physiques appropriées telles que les propriétés, les charges, les contraintes, les sources, et les flux matériels, plutôt qu'en définissant les équations fondamentales.

Caractéristiques du logiciel COMSOL :

On peut accéder à la puissance de COMSOL Multiphysics comme produit autonome par une interface utilisateur graphique flexible, ou par le manuscrit programmant dans le langage de manuscrit de COMSOL ou dans le langage de MATLAB.

En utilisant les modes d'application dans COMSOL Multiphysics, on peut exécuter de divers types d'analyse comprenant :

- Analyse stationnaire et dépendant du temps
- Analyse linéaire et non-linéaire

COMSOL Multiphysics est employé dans beaucoup de domaines d'application, juste quelques exemples étant:

- acoustique
- Biosciences
- réactions chimiques
- diffusion
- Electromagnétique
- dynamique liquide
- Cellules et électrochimie de carburant
- géophysique

- transfert thermique
- Systèmes de Microélectromécanique (MEMS)
- technologie de micro-onde
- système optique
- la mécanique quantique
- composants de radiofréquence
- dispositifs de semi-conducteur
- **mécanique des structurales**

Un autre dispositif unique est la capacité de COMSOL Multiphysics de mélanger des domaines de différentes dimensions de l'espace dans le même problème. Cette flexibilité simplifie non seulement modéliser, il peut également diminuer le temps d'exécution.

Présentation générale du logiciel

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui qui permettra de définir le ou les modèles physiques qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie (2D, 2D axisymétrique, 3D, ...). Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables, et quel est le suffixe propre à ce modèle. En effet, Comsol crée automatiquement des variables pour chaque modèle. Ces variables sont toujours suffixées par le nom du modèle auquel elles sont rattachées.

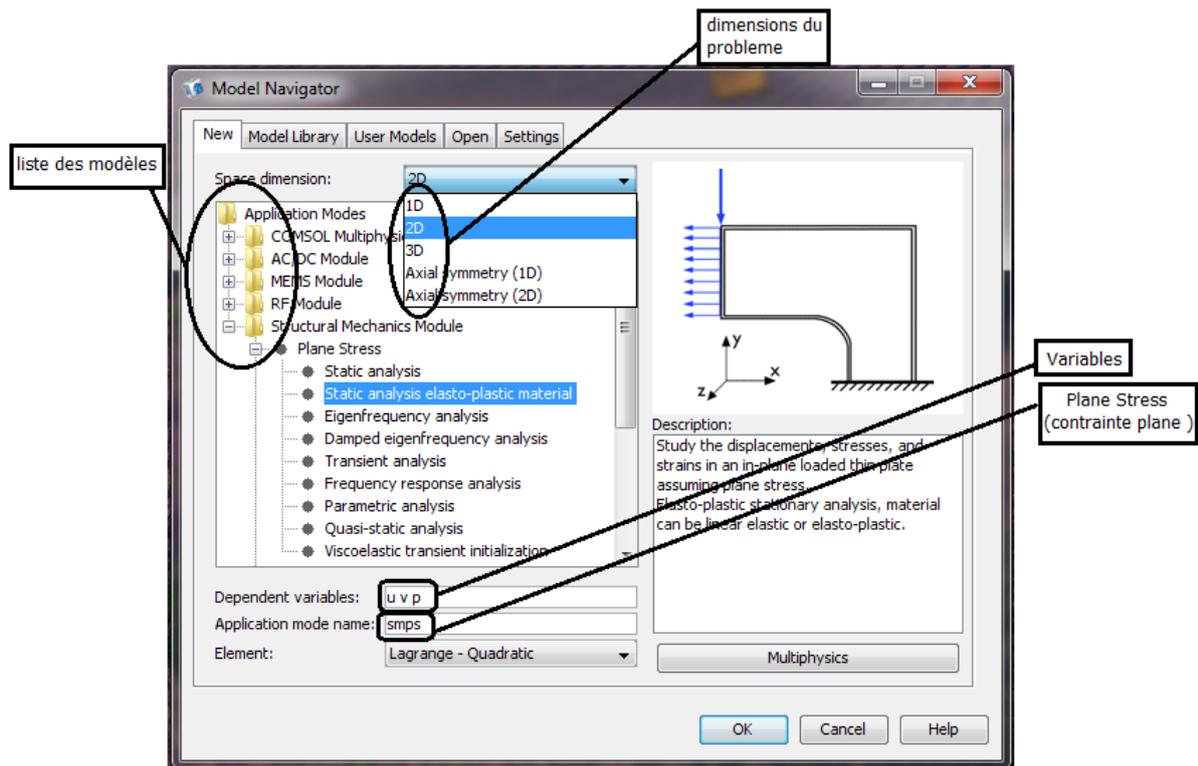


Figure A.1. Choix du modèle

Lorsque le ou les modèles ont été choisis, l'interface de Comsol 3.5 apparaît.

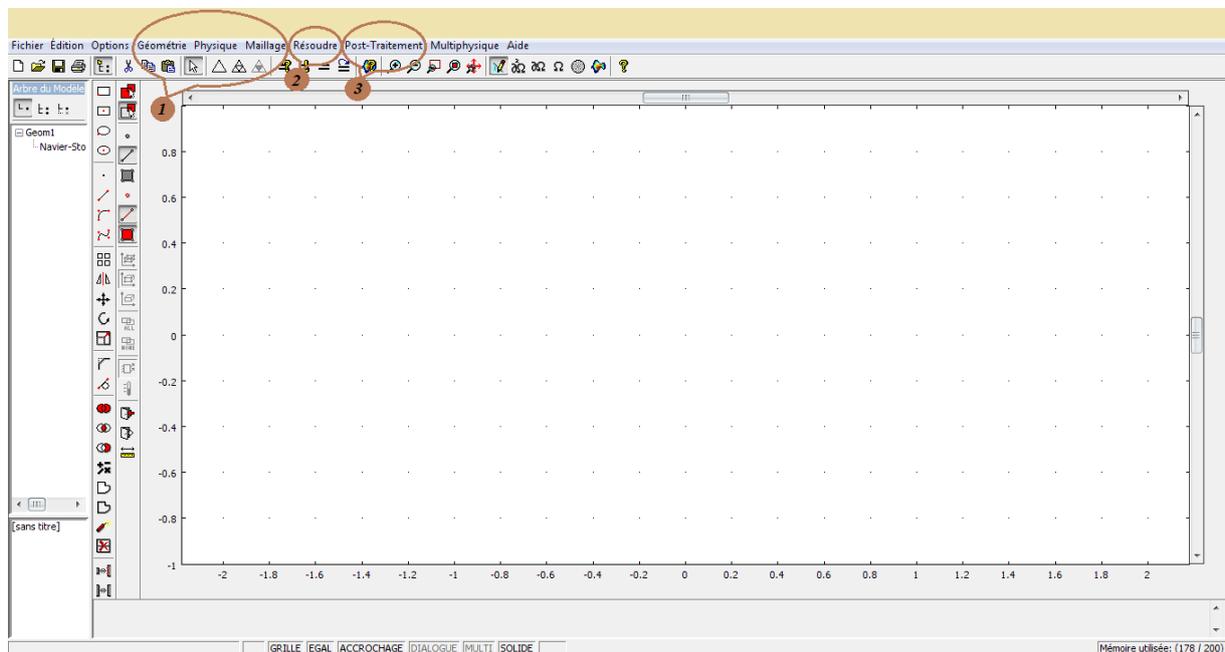


Figure.A.2.Interface Comsol Multiphysiques

D'une manière générale, lors de la création d'un projet, il faut parcourir le menu en allant de gauche à droite (1, 2 et 3). Nous allons donc d'abord construire la

géométrie du problème, on définit ensuite le comportement des domaines en leur associant des propriétés.

Si on travaille dans un espace 2D, on peut directement utiliser les commandes de la *figure.A.3*

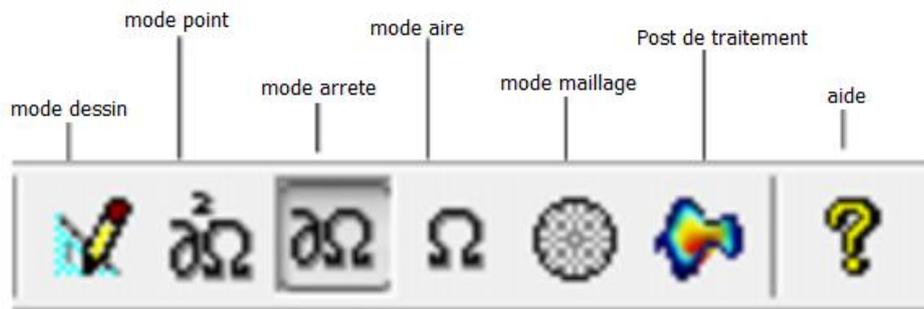


Figure.A.3. Navigation des modes de choix et d'affichage

Pour mieux assimiler la simulation sous Comsol on a générer directement du code de calcul un rapport résumant les étapes suivies par exemple pour simuler l'éprouvette $a = 5 \text{ mm}$ et $R = 25 \text{ mm}$

Les appellations sont laissée on anglais pour se repéré dans l'interface de COMSOL

Simulation sous COMSOL

Creation de la géométrie et le maillage

Après l'exécution de l'application COMSOL, on suit les étapes suivantes :

Dans le menu **Model Navigator** sélectionner **2D** dans la liste de **Space dimension**

Dans la liste des modes d'applications sélectionner **Structural Mechanics**

Module>Plane Stress>Static analysis elasto-plastic material; puis cliquer sur **OK**.

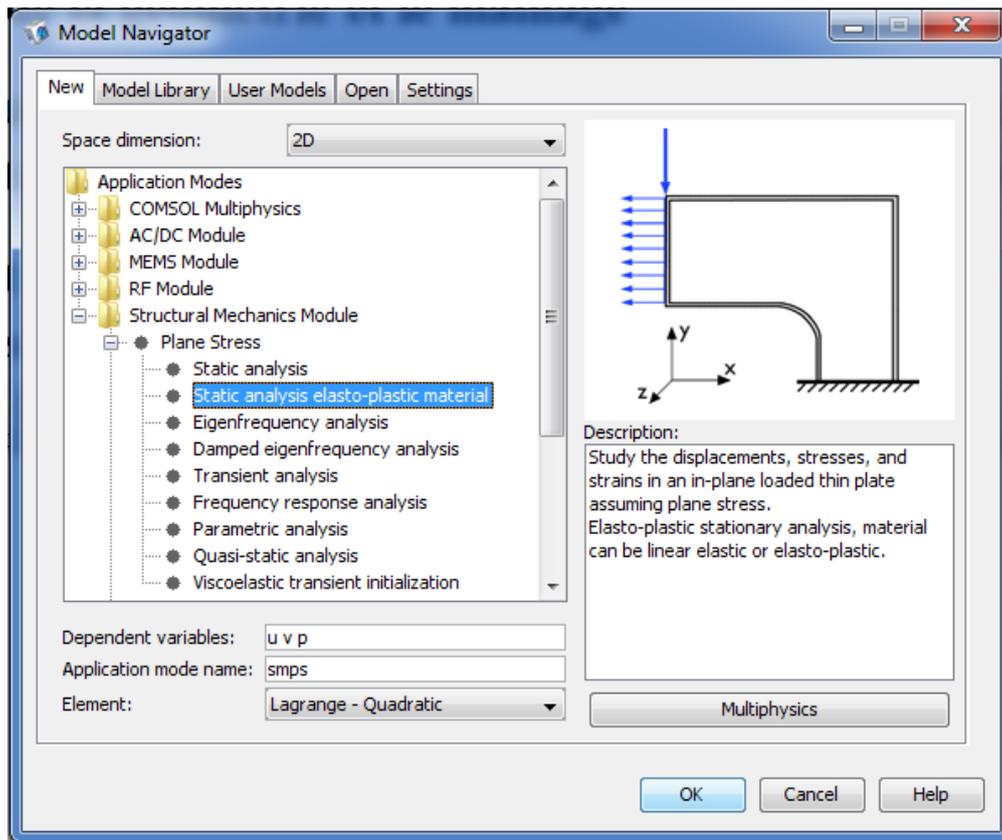


Figure.A.4 navigateur de modèles (model Navigator)

Avant de créer la géométrie on déclare les constantes et les valeurs de σ_{exp} représentées respectivement sur les *figures (A.5) et (A.6)*

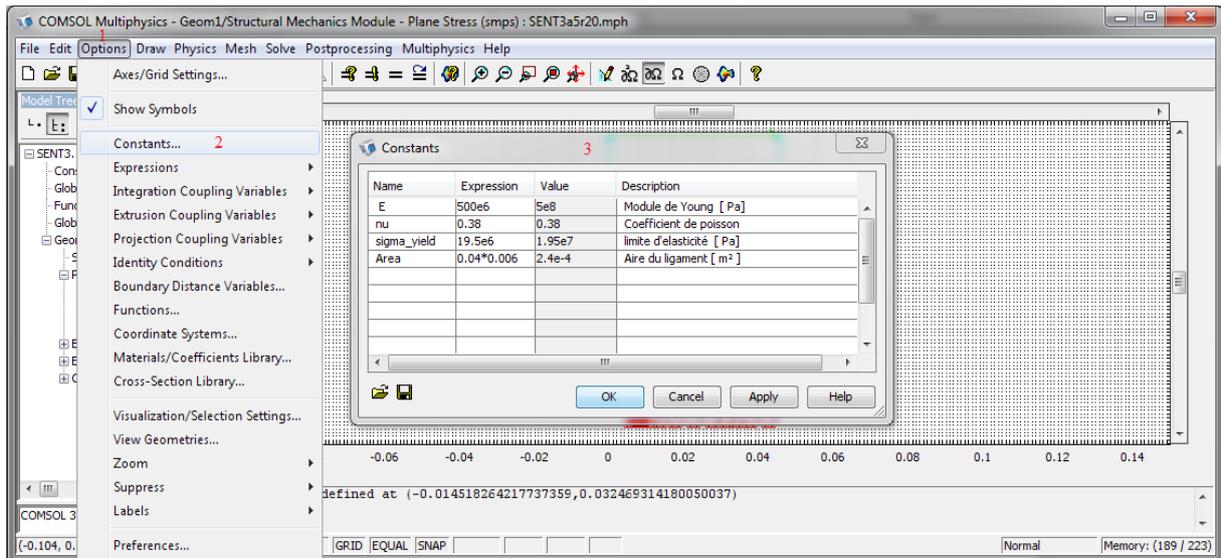


Figure .A.5 déclaration des constantes.

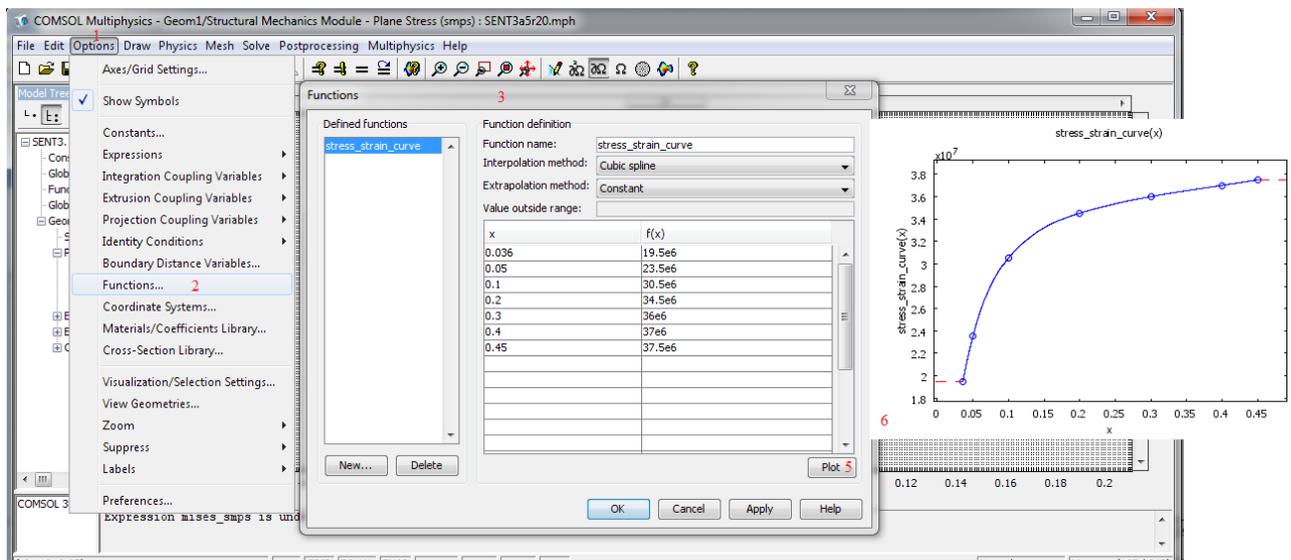


Figure .A.6 fonction de la contrainte expérimentale

Ecriture des expressions scalaires

Afin d'évaluer les valeurs de σ_{yhard} et l'intégrale J , telle que représentée sur la figure suivante :

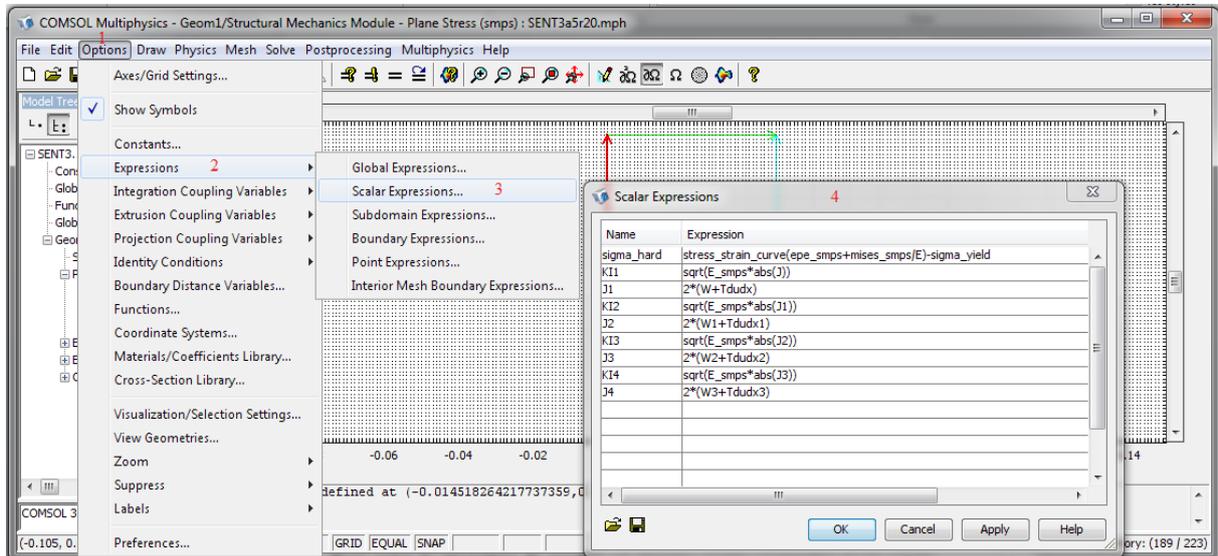


Figure .A.7 déclarations des variables scalaires

Pour créer la géométrie du modèle on dessine quatre rectangles et un cercle pour représenter le meulage de réparation,

Une fois la géométrie créée on procède à son maillage en utilisant la boîte de dialogue **Mesh**

propriétés physiques du matériau

Dans le menu **physic** choisir **Subdomain Settings**. Sélectionner les quatre « **subdomain** » créés et remplir les cases comme sur la figure .A.8.

En cliquant sur la case **propriété du matériau élasto-plastique**, voire *figure.A.9* on définit :

- le modèle d'érouissage
- la fonction de charge
- le niveau de la contrainte plastique correspondant à σ_e
- la fonction d'érouissage (*équation V.1*)

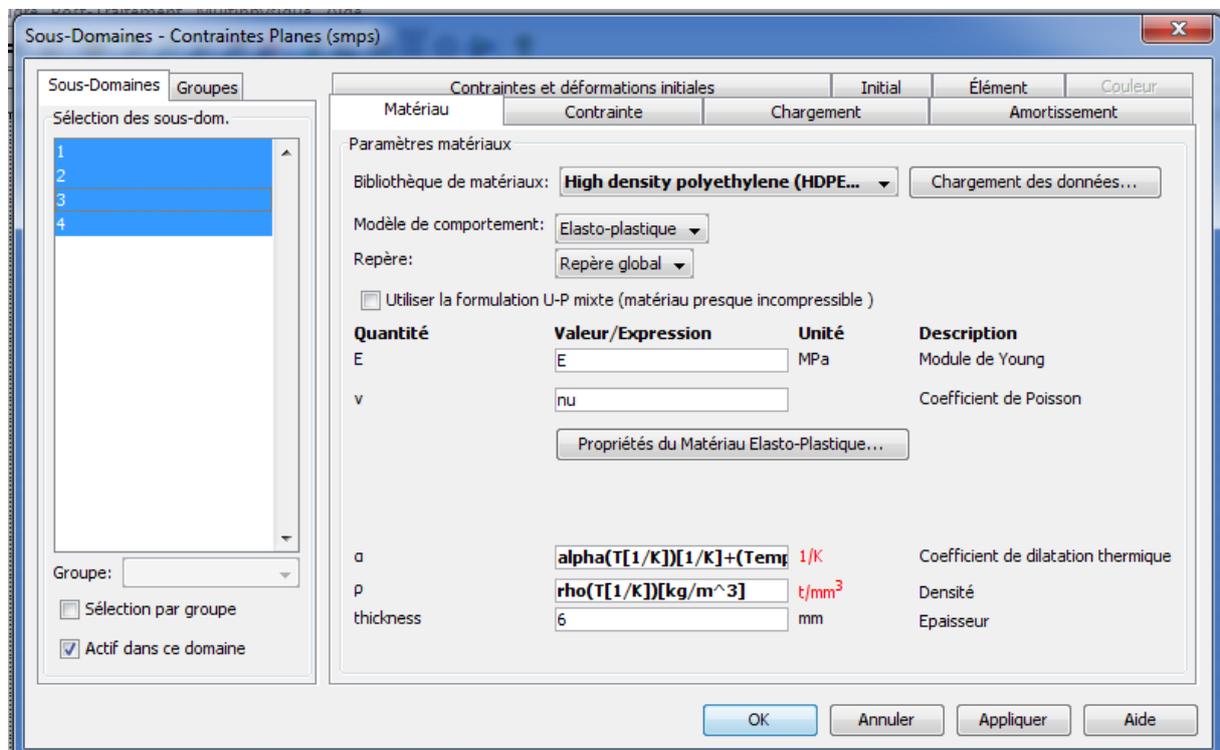


Figure.A.8 définition des propriétés physiques du matériau

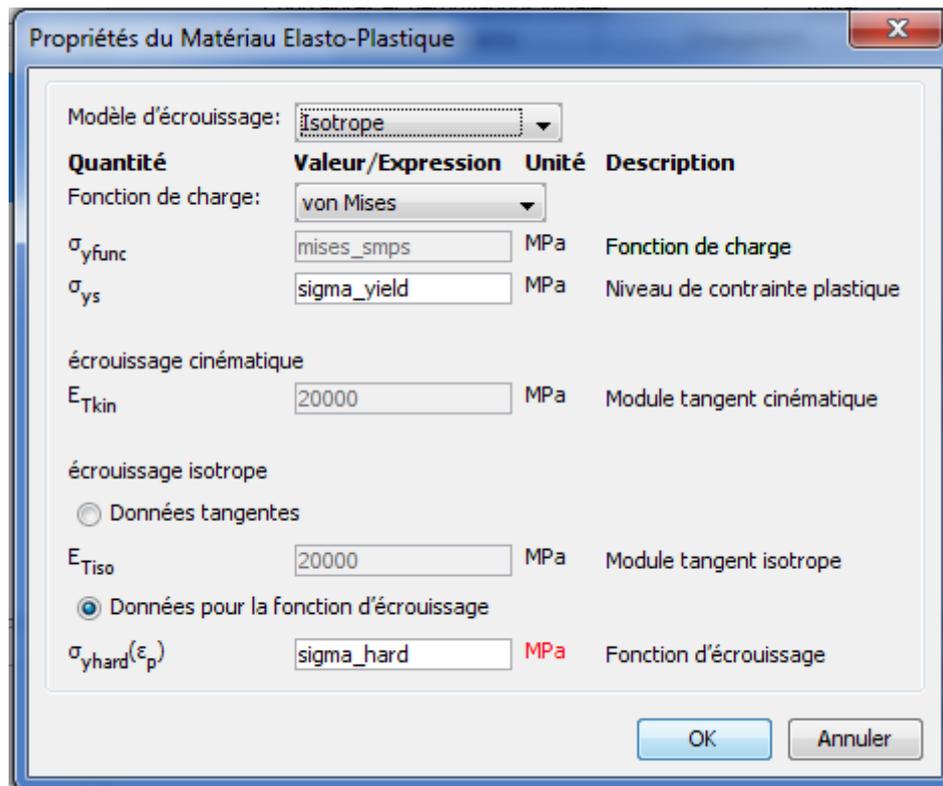


Figure.A.9 propriétés élasto-plastique du matériau.

Conditions aux limites

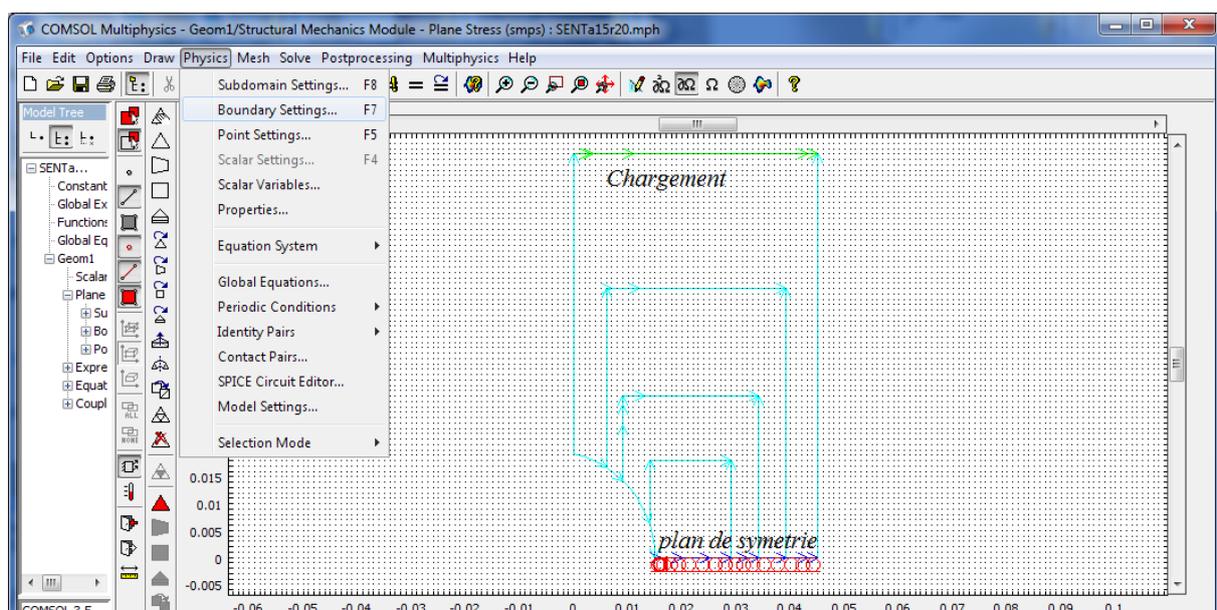


Figure .A.10 définition des conditions aux limites.

définition des paramètres de chargement

Les paramètres de chargement sont définis dans la boîte de dialogue

Solve > solver parameters, (voir *figure .A.11*).

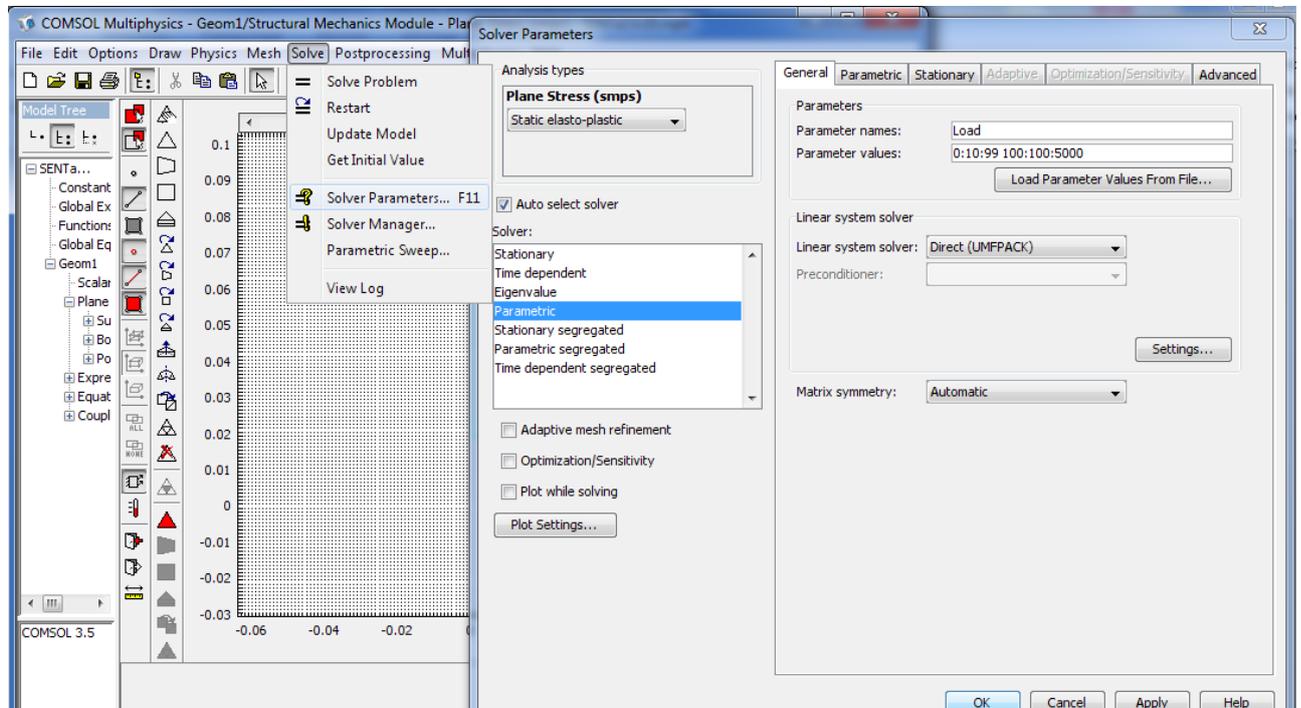


Figure. A. 11 définition des paramètres de chargement.

Une fois tous ces paramètres définis on lance l'analyse en cliquant sur

Solve > solve problem

A la fin de l'analyse on exploite les résultats de la simulation en utilisant la boîte de dialogue **Postprocessing**.

les courbes des figures suivantes montre la distribution des contraintes de Von Mises le long du ligament pour chaque profondeur d'entaille et le rayon de réparation considérés. Pour chaque courbe le chargement considéré est celui correspondant à F_p

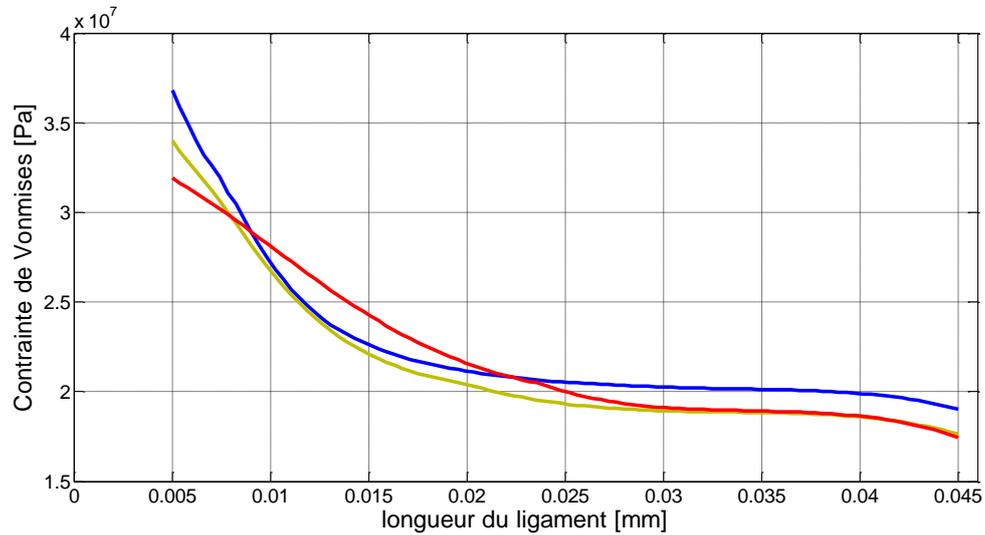


Figure A.12 distribution des contraintes de Von mises a=5mm

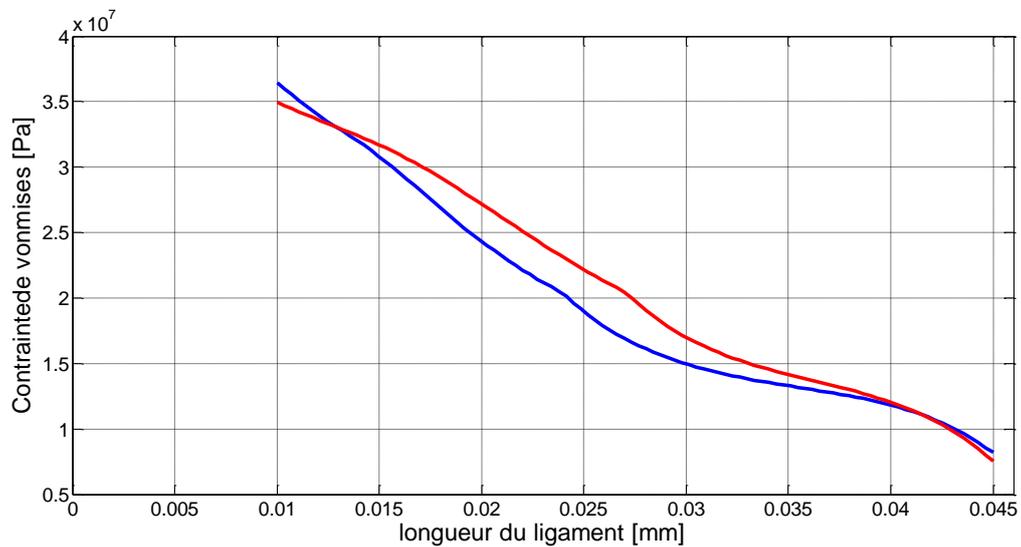


Figure A.13 distribution des contraintes de Von mises a=10mm

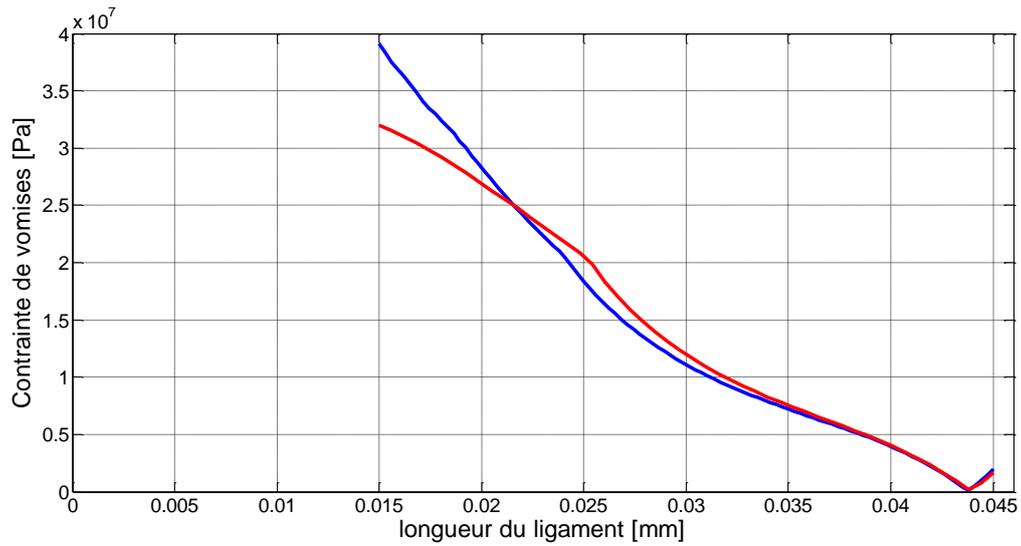


Figure A.13 distribution des contraintes de Von mises a=15mm

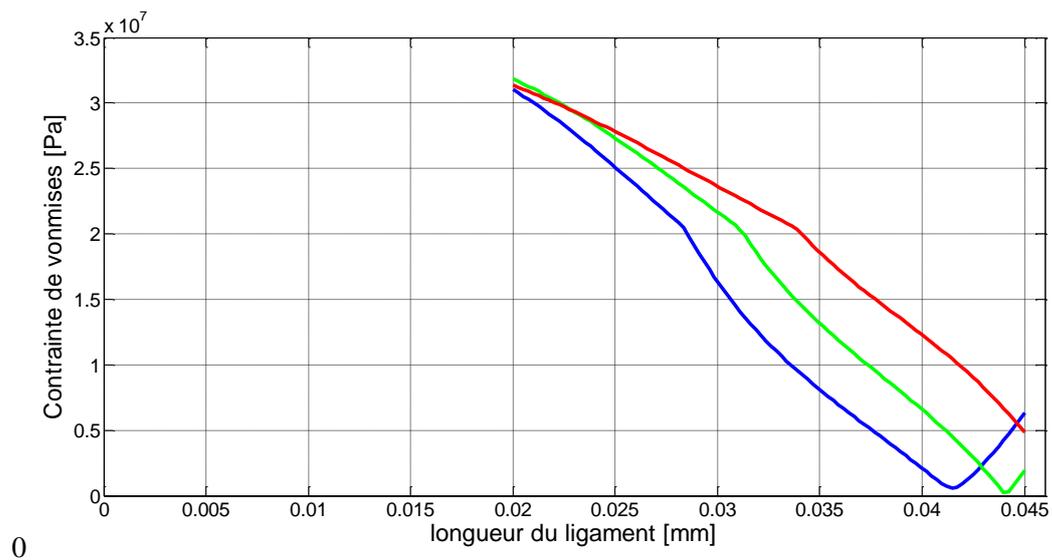


Figure A.13 distribution des contraintes de Von mises a=20mm

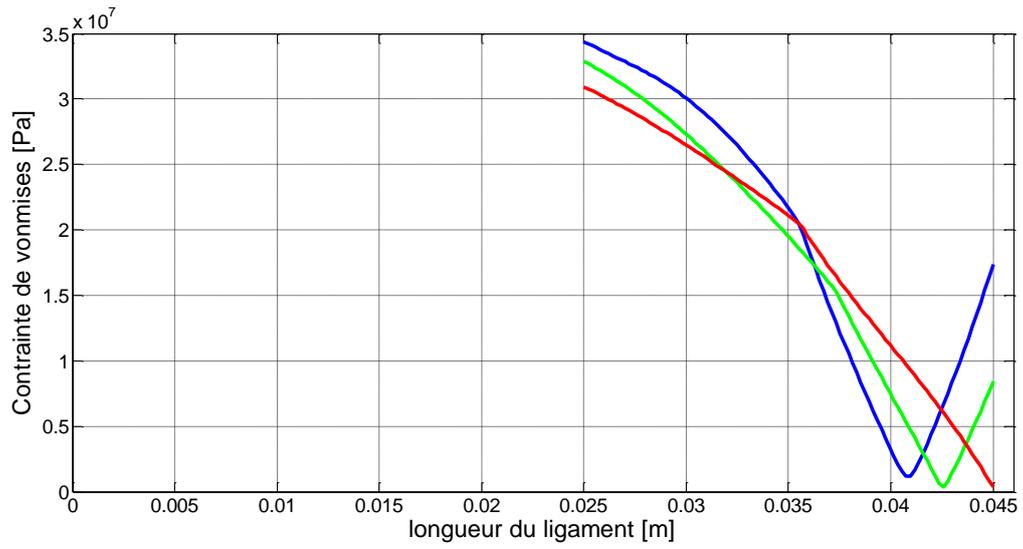


Figure A.13 distribution des contraintes de Von mises a=25mm