

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**  
**Faculté des Sciences Appliquées**  
**Département de Génie Mécanique**



**Mémoire**

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

**Présenté par :**

SOUATI ABDESSALAM

LAHRECHE CHAREF Eddine

**Thème**

**Analyse Numérique de Réparation des Organes  
de Production Pétrolière par Patch Composite**

Mr.Boukhatem

MCB

Université KasdiMerbah Ouargla

Président

Mr.A.Lahouel

MAA

Université KasdiMerbah Ouargla

Examineur

Mr.Mohamed.S.Bennouna

MCA

Université KasdiMerbah Ouargla

Rapporteur

## *Remerciement*

Nous tenons, tous d'abord à remercier en premier lieu et avant tous le grâce au **BON DIEU** le tous puissant, qui nous donne la force, la patience de mener à bien ce modeste travail.

Nous présentant nos sincères remerciements à notre encadreur Mr M.Bennouna

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre la société national des travaux au puits ENTP /Direction Engineering & Développement (DED) avec la Direction maintenance pétrolière(DMP).

Je tiens à remercier Mr KECIR Ahmed, Directeur de la Direction Engineering & Développement (DED) (ENTP)[filière SONATRACH], qui nous à motiver et encourager de réaliser cette expérience déjà pratiquée avec Sonatrach (Projet ourhood)(**T08-210-01 A**),et de les planifier comme objectif en collaboration avec le département de maintenance pétrolière.

## *Dédicace (1)*

### *Ce travail est dédié à :*

A la mémoire de mon très cher père

A ma très chère mère

A mon grand frère

A mes cher enfants Abderaouf ; Ahmed et Mohamed

A mes chers frères et sœurs

A tous ma famille

A toutes mes amies & collègues

## *Dédicace (2)*

### *Ce travail est dédié à :*

Mes chers parents

À mon grand-père et à ma grand-mère

À mes frères à toute la famille

À mes amis et à tous ceux qui m'ont aidé de près et de loin

## **Table de Matières**

<b>Chapitre I : Généralités sur la Mécanique de la Rupture et Fissuration.....</b>	<b>03</b>
I.1. Introduction.....	04
I.2. Aperçu historique sur la rupture .....	04
I.3. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception .....	06
I.4. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture .....	07
I.5. Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture.....	07
I.6. Les différents modes de rupture.....	09
I.6.1. Rupture fragile.....	09
I.6.2. Rupture ductile : .....	10
I.6.3. Rupture par fatigue.....	11
I.7. Rupture due au phénomène de la corrosion .....	11
I.7.1. Fissuration par corrosion.....	11
I.7.1.1. Fissuration par corrosion sous contrainte.....	12
I.7.1.2. Fatigue-corrosion .....	12
I.8. Mécanisme et modèles de fissuration .....	13
I.8.1. Modélisation de la fissure .....	13
I.9. Critères de rupture et de propagation.....	14
I.9.1. Approches globales à un seul paramètre .....	14
I.9.2. Approche énergétique .....	15
I.9.3. Mécanismes et modes de rupture .....	15
I.9.3.1 Mode de rupture .....	16
I.9.5. Facteur de concentration de contraintes .....	17
I.10. Conclusion .....	19

<b>Chapitre II: Technique et Méthodes de Réparation des Equipements de Productions Pétrolières.....</b>	<b>20</b>
II.1. Introduction.....	21
II.2. Réservoirs de stockage des produits pétroliers.....	21
II.3. Réservoir et composant.....	22
II.4. Les causes entraînant la provocation de la corrosion & l'endommagement des réservoir. 21	

II.4.1 .Cas d'endommagement et réparation des réservoirs.....	25
II.5.les pompes centrifuge .....	34
II.5.1.Les organes principaux d'une pompe centrifuge .....	35
II.6.L'effet défectueux de la corrosion & l'érosion sur la surface interne de la pompe centrifuge.....	35
II.7.Application adéquate de réparation par l'époxy de polymère.....	33
II.8.Avantages bénéficiés de la réparation et la protection des pompes centrifuge par l'alliage du polymère.....	34
II.9.Pipe-Line.....	37
II.10.Méthodes de réparation pour les pipe-lines .....	38
II.11.Collage des plaques métallique anti-usures.....	38
II.12. Méthode pratique de réparation & protection des Pipelines pétroliers contre la corrosion .....	38
II.12.1.Réparation par Patch composite .....	40
II.13.Avantages de la réalisation des réparations des pipelines par une gamme complète de polymères .....	42
II.14. Conclusion:.....	42
 <b>Chapitre III: Simulation et Méthode Numérique.....</b>	<b>43</b>
 III.1. Introduction :.....	44
III.2. Présentation du logiciel ABAQUS/CAE : .....	44
III.3. Etude de conception .....	45
III.3.1.Géométrie du réservoir à étudier.....	45
III.4.Calcul de la pression interne.....	47
III.5. Etude de simulation :.....	49
III.5.1. Calcul et résultat .....	49
III.5.2. L'opération d'assemblage : .....	51
III.5.3.Conditions aux limites.....	51
III.5.4.Maillage.....	52
III.5.5.Résultats et simulation.....	55
III.6. Conclusion:.....	63
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>64</b>

## Liste des Figures

### **Chapitre I: Généralités sur la Mécanique de la Rupture et Fissuration.....05**

Figure I. 1: Comparaison de l'approche classique (a) et de l'approche utilisant la MLR (b) .....	06
Figure I. 2: Différents cas d'éprouvettes avec fissure de bord .....	08
Figure I. 3: Courbe contrainte de déformation classique .....	08
Figure I. 4: Exemple de rupture fragile .....	09
Figure I. 5: Courbe contrainte de déformation dans le cas fragile et ductile .....	10
Figure I. 6: Exemple de rupture ductile .....	10
Figure I. 7: Agressions corrosives sur la paroi externe d'une canalisation métallique.....	11
Figure I. 8: Processus de fatigue-corrosion à partir d'une piqure de corrosion .....	12
Figure I. 9: Les différents types de fissures .....	13
Figure I. 10: Champ de Contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure.....	15
Figure I. 11: Champ des plans de cisaillement sous l'effet des contraintes .....	16
Figure I. 12: Différents paramètres géométriques définissant une entaille simple.....	18
Figure I. 13: Définition de la contrainte globale, maximale et nominale .....	18

### **Chapitre II: Technique et Méthodes de Réparation des Equipements de Productions**

#### **Pétrolières.....20**

FigureII. 1: Réservoir de stockage grand capacité à toit flottant (EL MERK/OURHOOD) .....	22
FigureII. 2: Réservoir de stockage grand capacité à toit fixe .....	22
FigureII. 3: Réservoir de stockage grand capacité à toit flottant .....	23
FigureII. 4: Réservoir de stockage grand capacité à écran flottant.....	23
FigureII. 5: Béton de fondation porte la structure du réservoir .....	26
FigureII. 6: Fissure sur la base du réservoir.....	26
FigureII. 7: Fissure réparée et étanchéité assurée du bas du réservoir.....	27
FigureII. 8: Application terminée pour deux réservoirs .....	27
FigureII. 9: Etat de surface extérieur du réservoir dégradé .....	28
FigureII. 10: Opération de sablage sur la zone corrodée du réservoir .....	29
FigureII. 11: La protection extérieure du réservoir par l'opération de pulvérisation d'une résine à base du polymère .....	29
FigureII. 12: Application réalisée avec finition .....	30
FigureII. 13: Bac de stockage à réparé.....	31
FigureII. 14: Cote endommagée par la corrosion .....	31
FigureII. 15: Composite à base d'époxy .....	32
FigureII. 16: Collage deux plaques métallique en acier anti-usure à froid.....	32
FigureII. 17: Infiltration d'eau .....	33
FigureII. 18: Dégradation du béton.....	33
FigureII. 19: Bitume de revêtement .....	33

FigureII. 20: Joint polyéthylène .....	33
FigureII. 21: Protection avec propriétés imperméabilisantes .....	34
FigureII. 22: Revêtement liquide appliqué à froid .....	34
FigureII. 23: Pompe centrifuge .....	34
FigureII. 24:Présentation des organes principaux d'une pompe centrifuge .....	35
FigureII. 25: Effets typique de l'érosion & la corrosion dans une pompe centrifuge .....	35
FigureII. 26: Dommages causés par la corrosion et la cavitation .....	36
FigureII. 27: Réparation de la surface de contact intérieure par un opérateur qualifié .....	36
FigureII. 28: Surface intérieure de la pompe centrifuge rénovée .....	36
FigureII. 29: Rénovation et réparation finalisée de la surface de contact d'une pompe centrifuge.....	37
FigureII. 30: Station de pompage pétrolière .....	37
FigureII. 31: Protection & réparation sur la conduite d'essence par collage à froid .....	38
FigureII. 32: Renforcement & protection (Pipe-line pétrolier) .....	39
FigureII. 33: Réparation et renforcement des zones endommagées par des plaques métalliques .....	39
FigureII. 34: Rebouchage des percements par Patch composite.....	40
FigureII. 35: Fuite d'eau due à la corrosion et l'eau saline .....	41
FigureII. 36: Sablage & percements rechargés par Patch composite avant le collage de la plaque métallique à froid .....	41
<b>Chapitre III: Simulation et Méthode Numérique .....</b>	<b>43</b>
Figure III. 1:Étapes à suivre pour la programmation .....	45
Figure III. 2: Géométrie et dimensions du réservoir .....	45
Figure III. 3:Coupe de présentation .....	46
Figure III. 4: Répartition des contraintes sur la paroi extérieure .....	46
Figure III. 5:Schémas descriptifs d'un réservoir de stockage .....	48
Figure III. 6:Partie du réservoir avec la fissure à réparer.....	49
Figure III.7:Plaque métallique pour renforcement.....	50
Figure III. 8:Patch composite à base de polymère.....	50
Figure III. 9: Réparation de la fissure par assemblage (soudage à froid) .....	51
Figure III. 10:Représentation des conditions aux limites.....	52
Figure III.11:Maillage de la partie du réservoir avec la fissure.....	53
Figure III.12: Maillage du patch.....	53
Figure III.13: Maillage de la plaque.....	53
Figure III.14:Maillage de l'assemblage.....	54
Figure III.15:Représentation du maillage par éléments finis du champ des contraintes de l'assemblage .....	55
Figure III. 16: L'influence des déplacements ( $\Delta L$ ) sur la paroi extérieure et la plaque métallique suivant les directions (x;y;z) .....	56
Figure III. 17: Représentation graphique des contraintes et les déplacements globaux appliqués sur la zone réparée .....	57

Figure III. 18: La répartition des contraintes ( $\sigma_{xx}$ ) et leur influence suivant l'axe des abscisses.....	57
Figure III. 19:L'influence des déplacements ( $\Delta L_x$ ) sur la paroi extérieure et la plaque métallique suivant l'axe des abscisses .....	58
Figure III. 20: Représentation graphique des contraintes et les déplacements appliqués sur la zone réparéesuivant l'axe d'abscisse .....	59
Figure III. 21:La répartition des contraintes ( $\sigma_{yy}$ ) et leur influence suivant l'axe des ordonnées.....	59
Figure III.22: L'influence des déplacements ( $\Delta L_y$ ) sur la paroi extérieure et la plaque métallique suivant l'axe des ordonnées (y).....	60
Figure III.23: Représentation graphique des contraintes et les déplacements appliqués sur la zone réparée suivant l'axe des ordonnées .....	61
Figure III.24: La répartition des contraintes ( $\sigma_{zz}$ ) et leur influence suivant l'axe des cotes (z) .	61
FigureIII.25: L'influence des déplacements ( $\Delta L_z$ ) sur la paroi extérieure et la plaque métallique suivant l'axe des cotes (z).....	62
Figure III.26:Représentation graphique des contraintes et les déplacements appliqués sur la zone réparée suivant l'axe des cotes.....	63



## Liste des Tableaux

<b>Chapitre III : Simulation et Méthode Numérique .....</b>	<b>43</b>
Tableau III. 1:Composition chimique de l'acier au carbone A 283 GR C .....	47
Tableau III. 2: Caractéristique mécanique de l'acier au carbone A 283 GR C .....	48
Tableau III. 3: Les valeurs des contraintes et les déplacements traités par abaqus (x;y;z).....	56
Tableau III. 4:Les valeurs des contraintes $\sigma_{xx}$ et les déplacements $\Delta L_x$ traités par Abaqus suivant l'axe d'abscisse (x).....	58
Tableau III. 5: Les valeurs des contraintes $\sigma_{yy}$ et les déplacements $\Delta L_y$ traités par Abaqus suivant l'axe des ordonnées(y) .....	60
Tableau III. 6: Les valeurs des contraintes $\sigma_{zz}$ et les déplacements $\Delta L_z$ traités par Abaqus suivant l'axe des cotes (z).....	62

## *Liste des abréviations*

MLR : Mécanique de la rupture linéaire

MEPR : Mécanique élastoplastique de la rupture

MDR : Mécanique dynamique de la rupture

MVER: Mécanique viscoélastique de la rupture

MVPR: Mécanique viscoplastique de la rupture

MNLR: Mécanique non linéaire de la rupture

FIG : Facteur d'intensité des contraintes

CTOD : Déplacement à fond de fissure (Crack Tip Opening Displacement)

CSC : Corrosion sous contrainte

PNB : Produit nationale brut

ASTM : Société américaine pour les essais des matériaux  
(American society for testing material)

XFEM: Xtended Finite Element Method

## **Introduction Générale**

Les matériaux en général et les composites à base de polymères jouent un rôle très important pour tout développement dans le domaine de la maintenance.

Une grande partie de l'activité économique des pays industrialisés est rattachée aux matériaux composites. Vu les exigences de l'industrie moderne, de nombreux programmes de recherche sont en route pour le développement, d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que les alliages des polymères et leur composites qui occupent toujours une place importante, car les caractéristiques technique dans le domaine de maintenance s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches.

Le phénomène de corrosion est un facteur source de gaspillage de matières et de défaillance pour les équipements de production tell que les pipe-lines, back de stockage, et les pompe centrifuge.

La corrosion peut aussi provoquer des accidents aux conséquences graves et contribuer à la pollution de l'environnement et même à la sécurité des opérateurs sur site elle provoque des pertes en vie humaine puisqu'elle est susceptible d'entraîner des problèmes de santé (explosion, pollution, contamination,...) elle touche des déférentes domaines de maintenance et spécifiquement le secteur de l'hydrocarbure.

L'industrie pétrolière comme tous les domaines ont abimé par le problème de corrosion, ce mal peut revêtir des formes variées d'une simple corrosion uniforme a des aspects plus complexe et plus dangereux.

Au cours de cette étude nous somme intéressé spécialement à la corrosion détecté au niveau des équipements de production pétrolière DP Hassi-messaoud installé sur la région ourhood Zone **(T08-210-01 A)**.

Notre objectif de cette étude et de confirmer la valeur ajoutée qui va apporter l'utilisation des matériaux composites a base de polymère pour la réparation des équipements de production contre les endommagements et la corrosion.

Le présente mémoire comporte trois chapitres. Dans le premier chapitre, généralité sur la mécanique de rupture et fissuration.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté les différentes méthodes utilisée pour la réparation des structures pétrolières.

Dans le troisième chapitre ont à intégrer la simulation par élément fini pour définir la valeur ajouté qui va ramener le soudage a froid et leur performance.

# ***CHAPITRE I***

*Généralités sur la Mécanique  
de la Rupture et Fissuration*

## I.1. Introduction

La mécanique de la rupture a pour objet essentiel l'étude des fissures macroscopiques : elle s'applique lorsqu'il existe dans le matériau des discontinuités telles dans la matière qu'elles viennent modifier l'état de contrainte, déformation et déplacement, si bien que l'homogénéisation du milieu n'a plus de sens. La séparation en deux parties disjointes d'un corps se produit à la suite de la phase d'amorçage, qui a vu le développement de microcavités, microfissures sous l'action de sollicitations mécaniques, thermiques, chimiques. La propagation de la ou des fissures macroscopiques peut conduire à la séparation complète de plusieurs morceaux ou bien au contraire les fissures peuvent s'arrêter. Le mode de rupture peut être fragile, la rupture se produisant alors souvent sans déformation plastique, ou ductile, en présence d'une déformation plastique importante.

La mécanique de la rupture a été introduite par Griffith vers 1920. L'objectif de la mécanique de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide de paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau.

Les premiers développements théoriques d'analyse des champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure ont été entrepris par Westergaard vers 1940. L'extension de la discipline a été amorcée par Irwin vers 1960. Depuis cette date, le développement de la mécanique de la rupture s'étend aux problèmes non linéaires matériellement et géométriquement, aux problèmes de bifurcation des fissures en modes mixtes et plus récemment aux composites, aux techniques numériques de résolution et à l'état de l'art relatif au dimensionnement de diverses structures complexes.[13]

Cependant, beaucoup de mécanismes de rupture sont encore mal connus notamment lorsqu'on utilise de nouveaux matériaux ou de nouveaux procédés. Le coût des ruptures catastrophiques représente, d'après les études économiques réalisées depuis le début des années 80, près de 4% du PNB dans les pays industriels développés. On peut réduire ce coût d'environ 30% en appliquant correctement les concepts connus de la mécanique de la rupture et de 25% supplémentaires en développant davantage la recherche dans le domaine de la rupture.

Toute structure contient des défauts, qu'ils soient introduits lors de l'élaboration du matériau ou lors de la fabrication de la pièce (défauts d'usinage ou de soudage par exemple). Ces défauts doivent être pris en compte car ils conditionnent la fiabilité de la structure et sa durée de vie.

## I.2. Aperçu historique sur la rupture

Eviter la rupture n'est pas en soi une idée nouvelle : les concepteurs des structures de l'Égypte des pharaons ou ceux de l'empire romain nous ont laissé des édifices que l'on peut encore contempler (pyramides, ponts ...).

Les matériaux utilisés avant la révolution industrielle étaient cependant limités pour l'essentiel au bois de construction, à la pierre ou à la brique et au mortier. La brique et le mortier sont relativement fragiles lorsqu'ils sont utilisés en traction.

Pour ces raisons, toutes ces structures anciennes (pyramides, ponts romains...) qui ont su résister au temps, étaient chargées en compression - en fait, toutes les structures de l'époque précédant la révolution industrielle étaient conçues pour des chargements en compression.

Il a fallu attendre la révolution industrielle au début du 19<sup>ème</sup> siècle, avec l'utilisation de l'acier pour pouvoir enfin concevoir des structures capables de résister à des charges de traction. La comparaison des anciens ponts romains avec les ponts modernes de structure métallique montre bien que les premiers étaient effectivement chargés en compression alors que les seconds le sont plutôt en traction.

L'utilisation de nouveaux matériaux ductiles (acier et autres alliages métalliques) pour des chargements en traction conduisit cependant à quelques problèmes.

Des ruptures se produisaient parfois pour des niveaux de charges bien inférieurs à la limite d'élasticité.

Dans un premier temps, ces risques de rupture ont été réduits en sur dimensionnant les structures. Mais cette solution devint insatisfaisante compte tenu des nécessités d'une part d'alléger de plus en plus les structures, et d'autre part de réduire les coûts.

La recherche en mécanique de la rupture devait donc être développée. Les premiers essais de rupture ont été menés par Léonard de Vinci (1452-1519) bien avant la révolution industrielle : il a montré que la résistance à la traction d'un fil de fer variait inversement avec la longueur de ce fil.

Ce résultat suggérait déjà que les défauts contenus dans le matériau contrôlaient la résistance de celui-ci : plus le volume est important (fil de fer long) plus la probabilité de présence de fissure est importante. Cette interprétation qualitative fût précisée plus tard en 1920 par Griffith qui établit une relation directe entre la taille du défaut et la contrainte de rupture. S'appuyant sur les travaux d'Inglis, Griffith appliqua l'analyse des contraintes autour d'un trou elliptique à la propagation instable d'une fissure. Il formula ainsi à partir du premier principe de la thermodynamique, une théorie de la rupture : un défaut devient instable et conduit à la rupture lorsque la variation d'énergie liée à une propagation du défaut atteint l'énergie spécifique du matériau. Cette théorie prédit correctement la relation entre la contrainte de rupture et la taille du défaut dans les matériaux fragiles. Cependant, dans les matériaux ductiles et notamment dans les alliages métalliques, l'avancée d'un défaut s'accompagne d'une importante dissipation d'énergie due à la plastification qui se développe à l'extrémité d'une fissure, énergie dont la théorie de Griffith ne tient pas compte (puisqu'elle ne considère que l'énergie de création de surface).

Il a fallu attendre les travaux d'Irwin en 1948 pour que l'approche de Griffith soit applicable aux matériaux ductiles : Irwin inclut dans le bilan énergétique, l'énergie due à la plastification. Les analyses des causes de rupture montraient que celles-ci provenaient de la combinaison de trois paramètres :

- ✓ les joints de soudures contenaient des fissures ;
- ✓ La plupart de ces fissures qui conduisaient à la rupture, se développaient à partir de zones de forte concentration de contrainte ;

- ✓ L'acier de construction utilisé pour les grandes structures métalliques, qui convenait pour les assemblages par rivetage, avait une faible ténacité.

Dès l'instant où la cause des ruptures était clairement identifiée, des plaques en acier de meilleure ténacité furent fixées près des zones de forte concentration des contraintes pour arrêter la propagation des fissures. On développa ensuite des aciers de forte ténacité et on améliora le procédé de soudage ; c'est dans ces années après la deuxième guerre mondiale qu'un groupe de chercheurs dirigé par Irwin étudia en détail le problème de la rupture au laboratoire national de recherche de la marine américaine. Si les recherches en mécanique de la rupture sont restées centrées entre 1960 et 1980 sur l'effet de la plastification, elles se sont ensuite orientées vers l'étude des comportements viscoplastique et/ou viscoélastique.

Le premier type de comportement se rencontre à température élevée, lorsque les phénomènes de fluage deviennent importants, alors que le second type caractérise les matériaux polymères - de plus en plus utilisés dans l'industrie. L'apparition des nouveaux matériaux composites nécessita également l'utilisation des concepts de la mécanique linéaire de la rupture pour la description du comportement de ces matériaux. Plus récemment, de nouvelles approches tentent de relier le comportement local à l'échelle microscopique au comportement global lors de la rupture d'un matériau. Ces approches micro-macro deviennent parfois nécessaires lorsqu'on atteint les limites d'utilisation des approches plus classiques. [1]

### I.3. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception

Deux approches sont utilisées pour le dimensionnement des structures (Figure I. 1).

La première, la plus classique, repose sur la limite d'élasticité du matériau  $\sigma_E$ , alors que la seconde s'appuie sur le concept de ténacité  $K_{IC}$  issu de la mécanique linéaire de la rupture (MLR). [2]

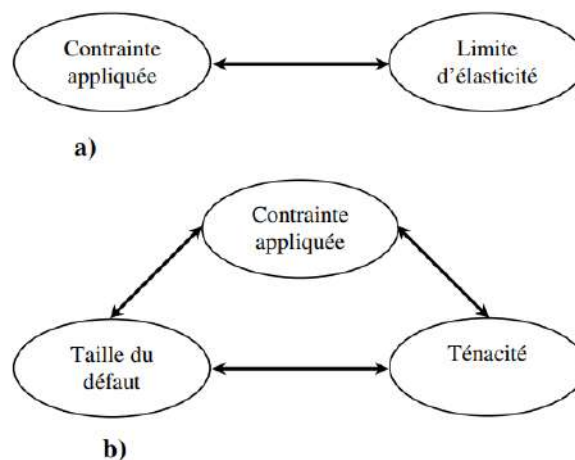


Figure I. 1 : Comparaison de l'approche classique (a) et de l'approche utilisant la MLR (b)

## I.4. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture

En mécanique de la rupture, le choix du concept varie selon le comportement physique du matériau.

La classification usuelle de ces concepts est la suivante :

-La mécanique linéaire de la rupture (MLR) pour les matériaux dont le comportement est essentiellement linéaire élastique, tels les alliages d'aluminium à précipitation durcissante, les aciers à haute limite élastique, les céramiques...

-La mécanique élastoplastique de la rupture (MEPR), pour les matériaux ductiles tels les aciers à faible ou moyenne résistance, les inox ou aciers austénitiques, les alliages de cuivre...

-La mécanique dynamique de la rupture (MDR), linéaire ou non linéaire, pour les métaux sollicités à grandes vitesses de déformation – dans ces conditions, le comportement peut aussi être viscoplastique.

-La mécanique viscoélastique de la rupture (MVER), essentiellement pour les polymères sollicités à des températures au-dessous de la température de transition vitreuse.

-La mécanique viscoplastique de la rupture (MVPR) pour les polymères au-dessus de la température de transition ou encore les métaux et les céramiques sollicités à haute température.[1]

## I.5. Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture

L'analyse dimensionnelle est un outil important pour l'étude de la mécanique de la rupture.

-Pour décrire cette approche, nous considérons les configurations de chargement représentées sur (la Figure I.2), où les différentes géométries de structures fissurées sont soumises à la même contrainte  $\sigma_\infty$  loin de la fissure. Comme il s'agit de problèmes plans, l'épaisseur des structures n'intervient pas.

-Figure I. 3a représente une fissure de bord de très petite dimension par rapport à celles de la plaque : le problème est donc traité comme un problème en milieu infini. La plaque est conçue dans un matériau dont le comportement est linéaire élastique, de module d'Young  $E$  et de coefficient de Poisson  $\nu$ .

-La taille  $a$  de la fissure de la figure 02b n'est plus négligeable : la largeur  $L$  de l'éprouvette devient une variable additionnelle.

-Le cas de mais cette fois-ci, avec un matériau élastoplastique (élastique plastique parfait).Figure I. 4c se présente sous la même configuration de chargement que le cas 02b Deux autres variables doivent être considérées : la limite d'élasticité  $\sigma_E$  du matériau et la taille  $p_r$  de la zone plastifiée qui se forme à l'extrémité de la fissure.[1]



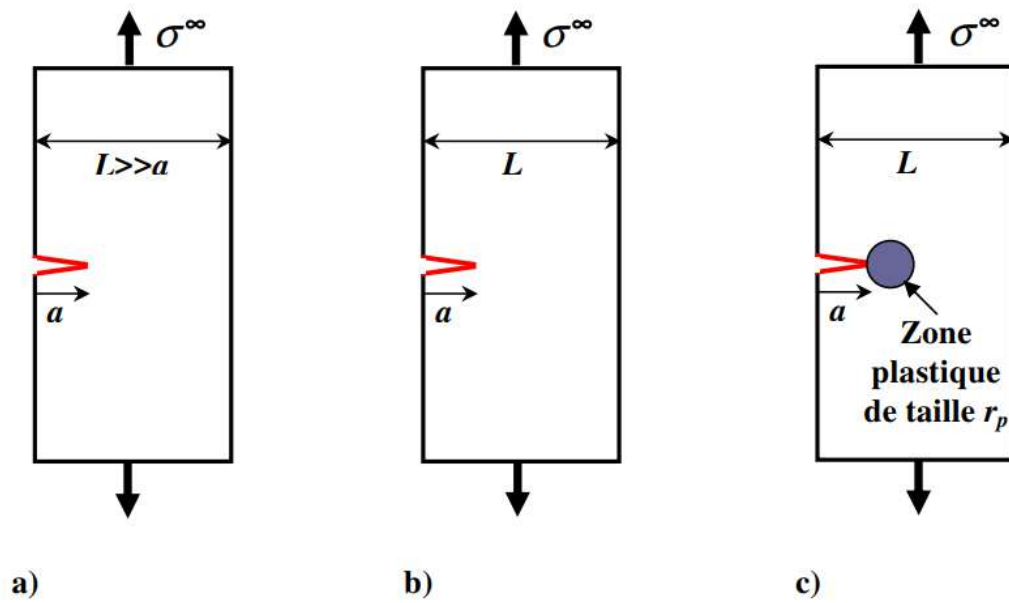


Figure I. 2 : Différents cas d'éprouvettes avec fissure de bord [1]

## I.6. Les différents modes de rupture

La courbe contrainte / déformation (Figure I. 3) issue, par exemple, d'essais de traction sur des éprouvettes jusqu'à la rupture, fait souvent apparaître deux zones lors de la déformation du matériau.

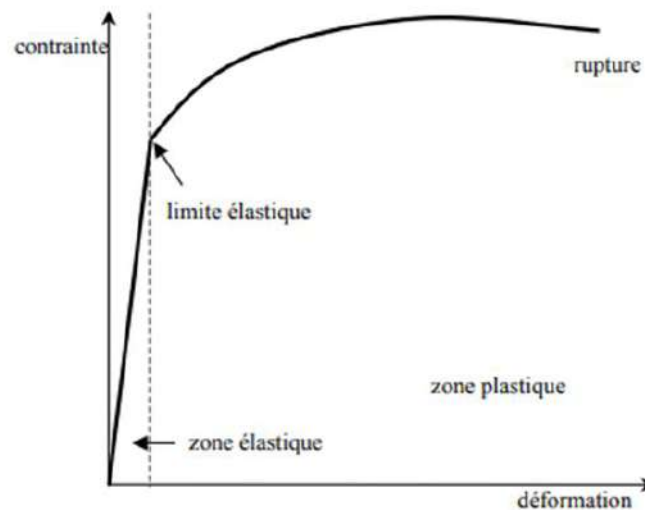


Figure I. 3 : Courbe contrainte déformation classique [15]

Au regard de la cristallographie (échelle des grains), les déformations élastiques et permanentes respectent la cohésion de la matière. De ce fait, la rupture survient lorsque cette cohésion est détruite. Elle opère par création de discontinuités surfaciques ou volumiques au sein de la matière. Il s'agit de microfissures de l'ordre du micron, qui deviennent des macro fissures en atteignant des dimensions de l'ordre du millimètre, et enfin, des fissures, à l'échelle des structures mécaniques. Deux mécanismes de rupture locale sont décrits : la rupture fragile et la rupture ductile.

### I.6.1. Rupture fragile

C'est une rupture contrôlée par la contrainte normale ou contrainte de clivage ; elle se produit sans déformation plastique (mécanique linéaire de la rupture) : les ruptures sont transgranulaires (rupture dans un grain cohérent suivant des plans cristallographiques bien définis) ; on observe des ruptures brillantes avec des facettes.

La rupture fragile est caractérisée par une cassure sans déformation plastique, ou avec une déformation plastique faible. La déformation avant rupture est donc presque exclusivement élastique.[3]

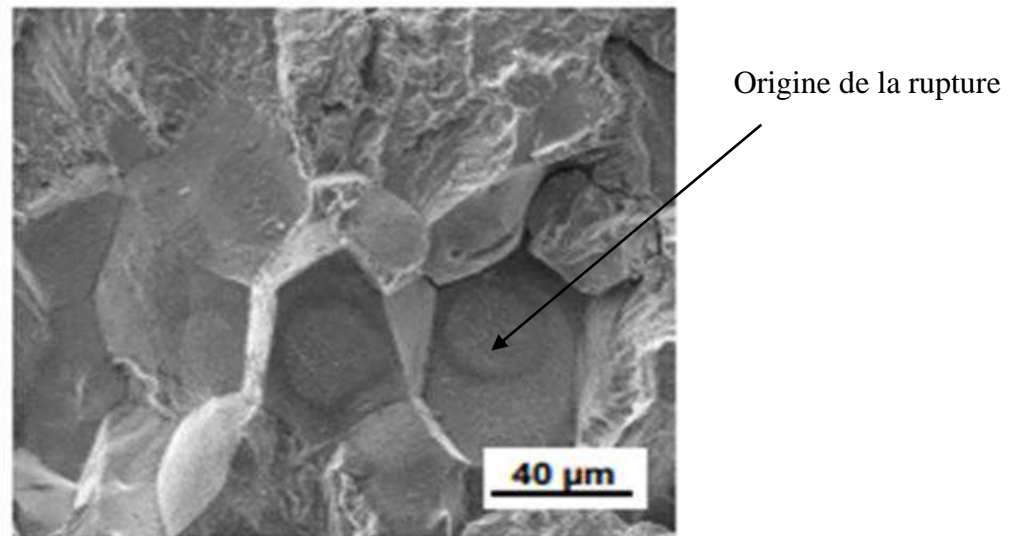


Figure I. 4 : Exemple de rupture fragile [14]

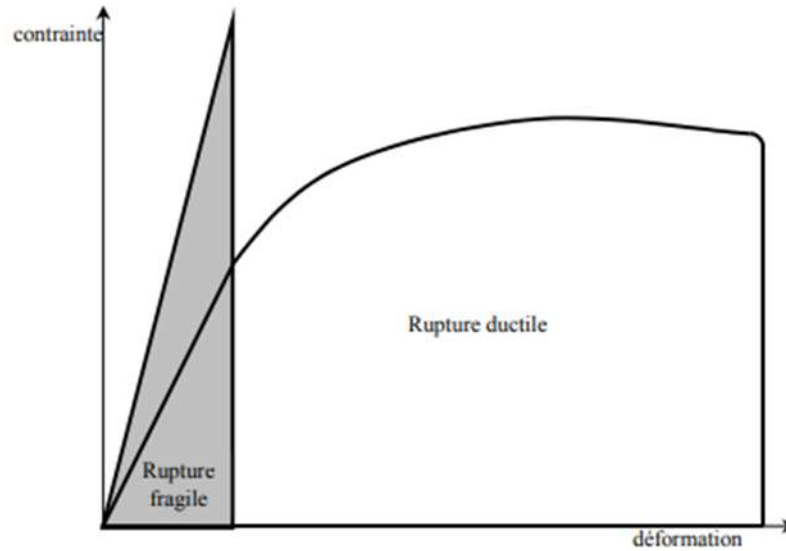


Figure I. 5 : Courbe contrainte déformation dans le cas fragile et ductile [15]

### I.6.2. Rupture ductile

La rupture ductile est précédée d'une déformation plastique importante : l'aspect est granuleux, on observe souvent des cupules liés à une décohésion autour des inclusions. La rupture ductile est caractérisée par une forte déformation plastique après la phase élastique (Figure I. 6). L'énergie de rupture est alors beaucoup plus élevée. La rupture ductile est le résultat de l'instabilité des très grandes déformations locales engendrées au voisinage de défauts cristallins. Au voisinage de ces défauts, les sollicitations extérieures créent des concentrations de contraintes qui engendrent de grandes déformations plastiques.[3]

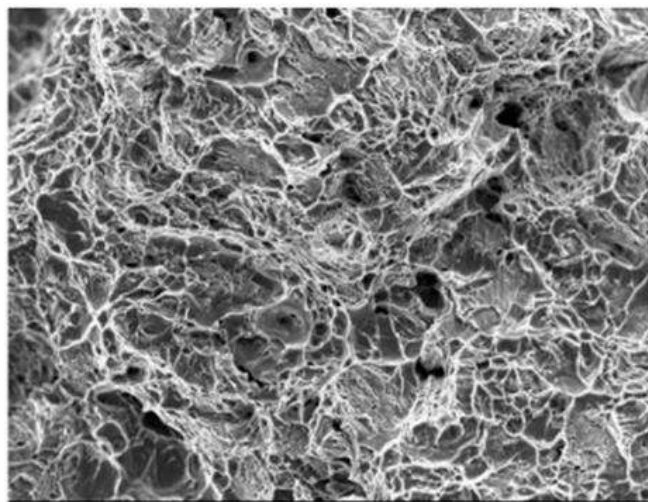


Figure I. 6 : Exemple de rupture ductile [3]

### I.6.3. Rupture par fatigue

Parmi les défaillances d'origine mécanique, on considère que plus de 90% des défaillances sont dues à un phénomène redoutable : la rupture par fatigue. Celle-ci se produit sans prévenir, sans dissipation notable d'énergie et peut causer des dégâts considérables, en particulier sur des pièces tournantes. La fatigue est l'exposition à un chargement cyclique non monotone, qui comporte des phases de chargement et de déchargement. La fatigue peut être due à plusieurs causes : une vibration normale ou anormale (apparition d'un balourd dans une pièce tournante, par exemple), des contraintes d'origine thermique (gradients de température variables dans les temps, incompatibilité de dilatation thermique...) en plus des chargements en service qui peuvent être très sévères (amortisseurs par exemple).[6]

### I.7. Rupture due au phénomène de la corrosion

Généralement la corrosion est très présente sur les canalisations métalliques, elle représente tout processus de dégradation des métaux et alliages faisant intervenir au moins partiellement, la composition chimique de leur environnement (Figure I. 7) En d'autre terme, on peut dire que la corrosion d'un métal est la destruction de celui-ci sous l'effet de réactions chimiques ou électrochimiques, lorsqu'il est en contact avec un électrolyte. Elle correspond donc au retour de la matière à son état le plus stable. Dans le cas du fer par exemple, la forme stable dans la nature n'est pas le métal mais l'oxyde. C'est pourquoi une pièce en acier exposée sans protection à une atmosphère humide tend à se transformer en rouille (oxyde de fer hydraté).[8]

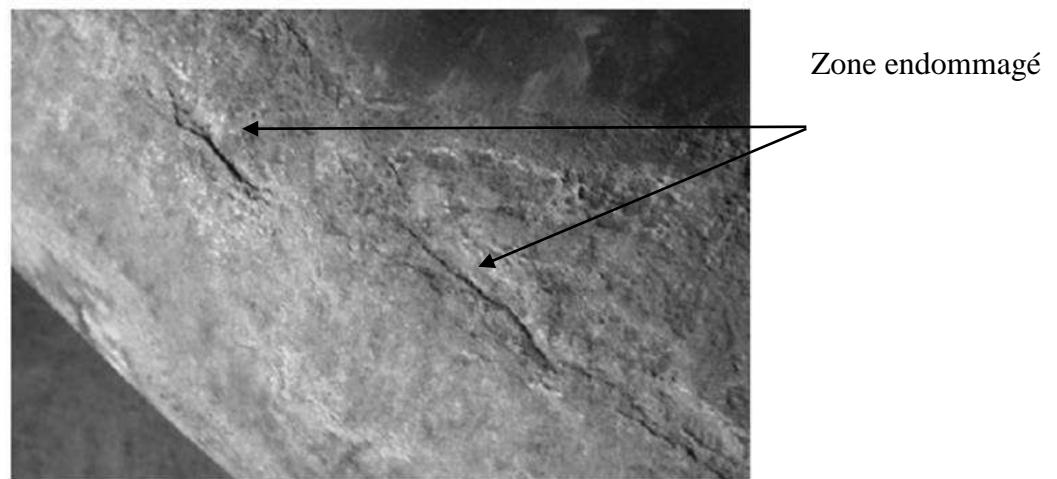


Figure I. 7 : Agressions corrosives sur la paroi externe d'une canalisation métallique

## I.7.1. Fissuration par corrosion

On constate souvent que la corrosion aqueuse attaque les métaux localisée autant que ou plutôt uniforme, et ceci peut conduire à la rupture d'une pièce beaucoup plus rapidement que ce qui supposant d'après les vitesses moyennes de corrosion.

La contrainte et la corrosion agissant simultanément peuvent être particulièrement nocives, et produire des fissures qui se propagent rapidement et de façon imprévisible.

Deux types de fissuration par corrosion conduisent couramment à des dégâts imprévus. Ce sont :

### I.7.1.1. Fissuration par corrosion sous contrainte

Elle se produit sous l'action simultanée de contraintes et 'un milieu corrosif' et provoque la fissuration inter-granulaire du métal souvent sous forme ramifiée.

### I.7.1.2. Fatigue-corrosion

La fatigue représente la tendance du métal à se fracturer sous l'action répétée d'un cycle de contrainte. La fissuration apparaît normalement au-dessous de la limite élastique.

La 'corrosion Sous fatigue' est une réduction de la résistance à la fatigue due à la présence d'un milieu corrosif .[7]

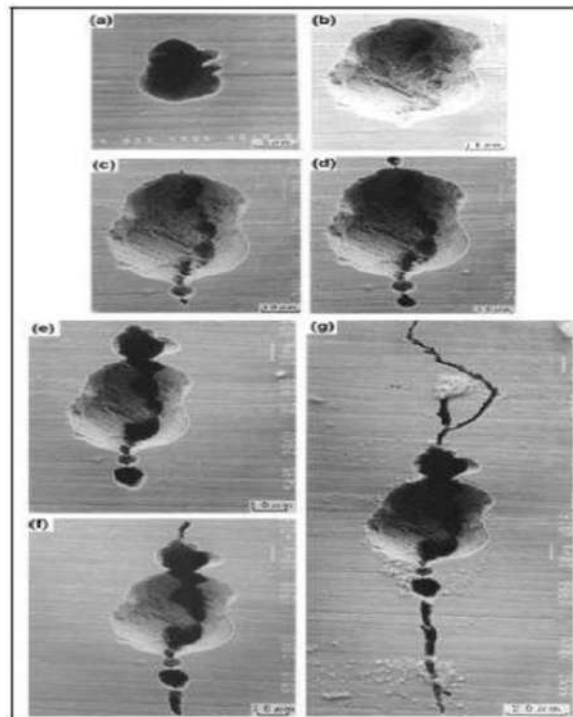


Figure I. 8 : Processus de fatigue-corrosion à partir d'une pique de corrosion

## I.8. Mécanisme et modèles de fissuration

Afin de prévoir la rupture des pièces mécaniques sollicitées en fatigue, beaucoup de laboratoire ont tenté, au moins pour des raisons pratiques, d'établir des lois empiriques de fissuration, utilisées au bureau d'étude.

Si les mécanismes propres à la fatigue commencent à peine d'être connus, l'influence de certains paramètres sur la vitesse de fissuration est généralement mieux définie. Nous pouvons les classer en deux catégories :

-Les paramètres essentiels qui dépendent du matériau lui-même. Module de Young, limite d'élasticité, propriétés cycliques et état métallurgique du matériau.

-Les paramètres extrinsèques qui dépendent des conditions de l'essai, quel que soit le matériau étudié, température, environnement, dimension de l'éprouvette, rapport de charge R, etc.

### I.8.1. Modélisation de la fissure

Une fissure est une petite fente dans un solide. Cette fente peut apparaître à la surface de la pièce (fissure superficielle), se trouver complètement à l'intérieur et être donc invisible depuis l'extérieur (fissure interne), ou traverser complètement la pièce (fissure traversante). Ces trois cas de figure sont schématisés sur (Figure I. 9).

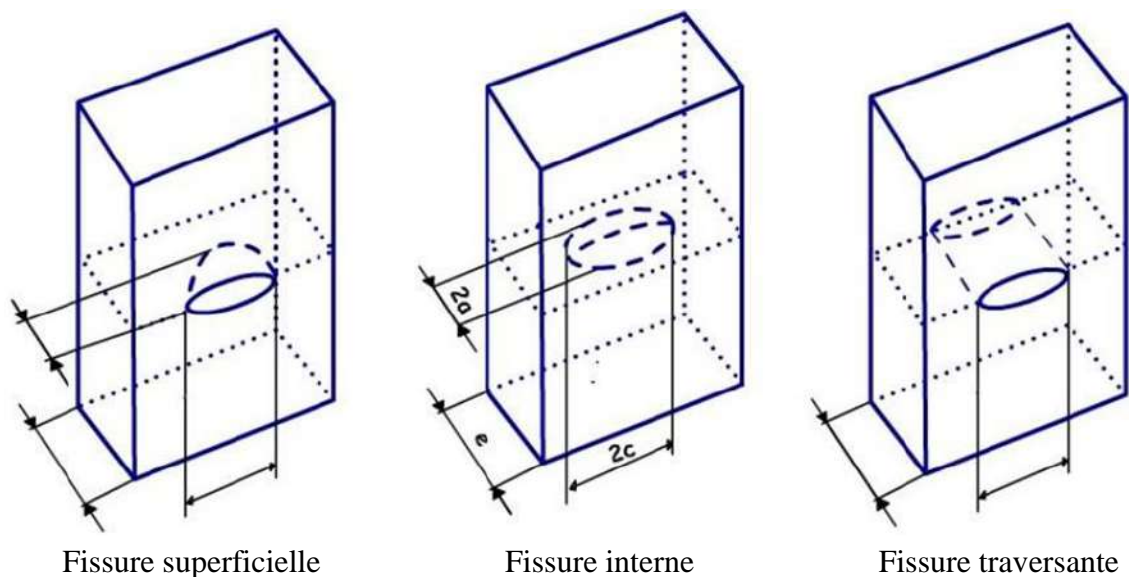


Figure I. 9 : Les différents types de fissures

Pour modéliser les fissures, on suppose souvent que leur géométrie est simple :

- Leur forme est elliptique, semi-elliptique ou en forme de coin ;
- Les deux faces de la fissure sont planes, parallèles et écartées d'une distance très petite devant les deux autres dimensions de la fissure. On assimile donc la fissure à son plan moyen ;

Les deux faces se rejoignent selon un bord anguleux et, en conformité avec l'hypothèse précédente (faces parallèles), forment un angle quasiment nul.[4]

## I.9. Critères de rupture et de propagation

Le calcul à la rupture est une méthode ancienne qui est associée à un coefficient de sécurité. Il s'appuie sur la connaissance de la géométrie de la structure et des caractéristiques mécaniques du matériau utilisé pour sa fabrication. La mécanique de la rupture est une approche qui considère l'état de contraintes près d'une fissure ou d'un défaut géométrique. Elle permet de prévoir, en fonction des dimensions d'une fissure, de l'état de chargement, des caractéristiques du matériau et notamment de la ténacité, le chemin de propagation de cette dernière et la condition de rupture associée.

### I.9.1. Approches globales à un seul paramètre

La mécanique de la rupture s'avère un domaine approprié pour calculer les tailles critiques des fissures, la pression d'essai et la pression maximale de service du pipeline et comprendre ainsi le mode de ruine.

La tâche n'est pas simple ; les fissures conduisent, en théorie, à une singularité mathématique (les contraintes et les déformations croissent à l'infini à l'approche du front de fissure).

Griffith est le premier à mettre en évidence un terme caractérisant le chargement et le critère associé: lorsque la fissure est chargée, le champ de contraintes en pointe de fissure est proportionnel à un scalaire dit facteur d'intensité de contraintes, noté  $K_I$ .

Pour un matériau fragile, si le chargement croît,  $K_I$  reste proportionnel au chargement et la propagation apparaît lorsqu'il atteint une valeur critique, caractéristique du matériau notée  $K_{Ic}$ .

Cette découverte constitue un des fondements de la mécanique de la rupture.

Depuis, d'autres mécanismes de propagation de la fissure, pour d'autres comportements (élastoplastique, viscoplastiques) ont été analysés avec plus ou moins de succès.

Pourtant, même pour ces chargements ou comportements complexes,  $K_I$  reste omniprésent dans les analyses, principalement la caractérisation du chargement de fissure.

Nous citons les exemples d'applications suivants :

-Pour les matériaux fragiles,  $K_{Ic}$  est toujours le critère le plus efficace utilisé pour estimer la propagation de la fissure.

-Pour les matériaux ductiles pouvant admettre des déformations plastiques, différents types de critères existent. Le plus utilisé pour les risques d'amorçages, est l'équivalent du  $K_{Ic}$ , le terme énergétique  $J_{Ic}$ . L'intérêt est que  $J$  caractérise l'énergie en pointe de fissure et que des modèles analytiques estiment  $J$  à partir de  $K_I$  et de la courbe de traction du matériau.[3]

## I.9.2. Approche énergétique

Griffith construit un modèle de fissuration qui tient en deux hypothèses :

- A chaque fissure est associée une énergie de surface qui est proportionnelle à l'aire créée.
- Le critère de propagation de fissure est basé sur un bilan d'énergie : une fissure se propage si l'énergie que restituerait le milieu lors d'un accroissement virtuel infinitésimal de la fissure compense l'énergie de surface que nécessiterait sa création et qu'au contraire la fissure ne se propage pas si cette restitution n'est pas suffisante.

De façon générale, le taux de restitution d'énergie  $G$  est défini par la variation de l'énergie potentielle  $P$  stockée dans la structure lors de l'augmentation de la surface libre correspondant à l'extension de la fissure :

$$G = \lim + \frac{\Delta \Pi}{\Delta a} = \frac{\partial \Pi}{\partial a} \dots (1)$$

Avec :  $\Pi = U - F$  l'énergie potentielle,  $F$  le travail des forces extérieures et  $U$  l'énergie de déformation élastique du solide.[3]

## I.10. Mécanismes et modes de rupture

Nous nous intéressons aux champs de déplacement et de contrainte au voisinage du front de fissure. Nous plaçons un repère dont l'origine se trouve sur un point  $O$  du front de fissure (Figure I. 5).

À ce repère orthogonal, on associe également un système de coordonnées polaires

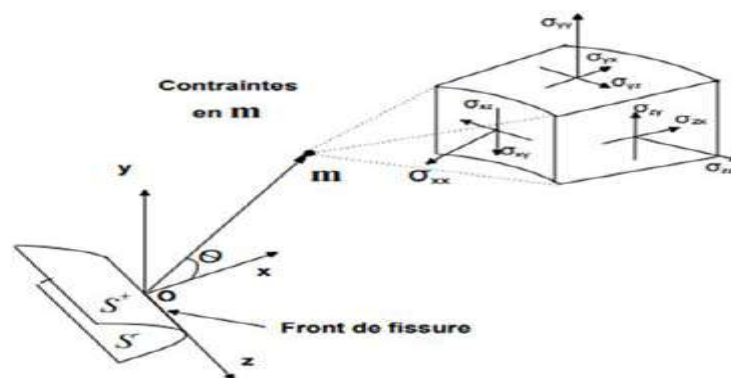


Figure I. 10 : Champ de Contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure [3]



### I.10.1. Mode de rupture

Une fissure est définie comme la surface  $\Sigma$  séparant localement un solide en deux parties. Le champ des déplacements est alors discontinu à travers cette surface et les trois composantes vectorielles de cette discontinuité forment les trois modes de rupture (Figure I. 11) : le mode I pour une ouverture et le mode II pour un glissement plan (dans un cas tridimensionnel, le mode III pour un glissement anti-plan).

Le cas réel est une superposition de ces modes, on parle alors de mode mixte

-Mode I : mode d'ouverture de la fissure, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont perpendiculaires à la direction de propagation.

-Mode II : mode de cisaillement dans le plan, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles à la direction de propagation.

-Mode III : mode de cisaillement hors du plan, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles au fond de la fissure.

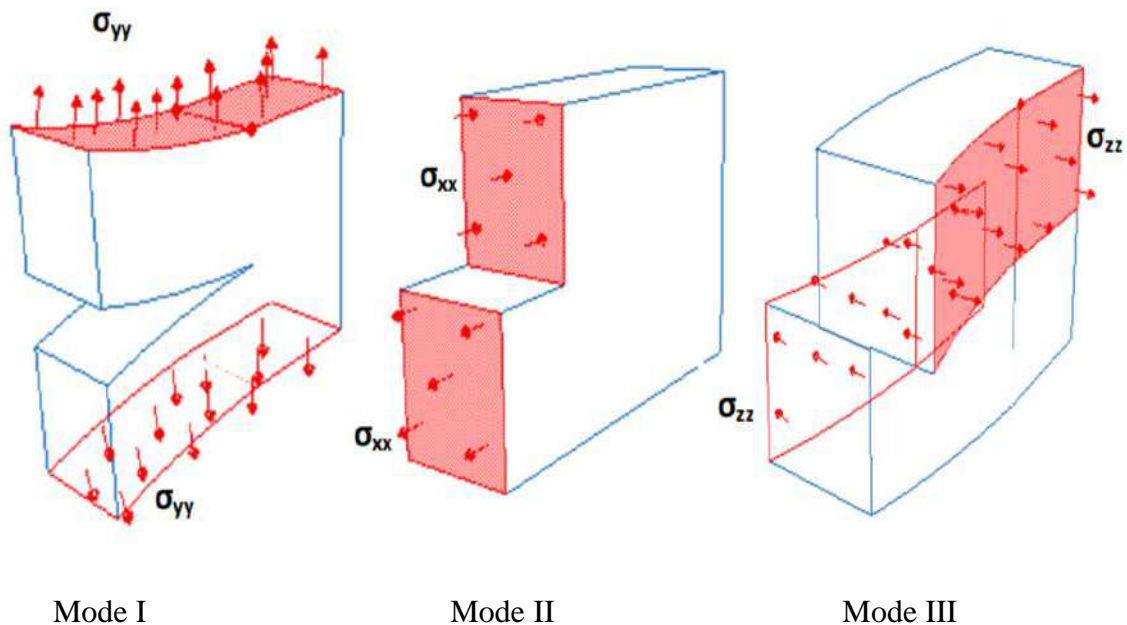


Figure I. 11: Champ des plans de cisaillement sous l'effet des contraintes[3]

## I.10.2. Facteur de concentration de contraintes:

Les paramètres de rupture (K ou J) sont très sensibles à la présence de concentration de contraintes d'hétérogénéités, issues des formes de pièces ou de contraintes dues à la façon dont elles sont assemblées. Ces zones de concentrations sont des sites préférentiels d'amorçage. Pour étudier ce phénomène, des entailles artificielles sont créées sous différentes formes et tailles. L'angle d'entaille  $\phi$  et le rayon  $\rho$  en fond d'entaille sont donnés en (figure I.12). Le facteur de concentration de contrainte ( $K_t$ ) relie la contrainte nominale de chargement à la contrainte maximale que va subir l'extrémité à l'entaille. Ce facteur dépend uniquement des dimensions géométriques relatives de l'entaille (plus le rapport  $a/\rho$  augmente et plus  $K_t$  augmente) et son expression analytique diffère selon le chargement. Peterson définit le facteur de concentration des contraintes  $K_t$  de deux manières : la première étant le rapport de la contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  (ou du cisaillement maximal  $\tau_{\max}$ ) en fond d'entaille à la contrainte nominale  $\sigma_n$  (ou de cisaillement nominal  $\tau_n$ ) dans la section correspondante de la pièce entaillée. Dans le cas d'une plaque semi-infinie comportant des entailles en U et semi elliptiques (Figure I.6), Baratta et Neal ont procédé aux calculs des facteurs de concentration de contraintes  $K_t$  pour différents rapports  $a/\rho$ . Baratta et Neal regroupent les valeurs des rapports du facteur de concentration de contraintes correspond à l'entaille en U et celui de l'entaille semi elliptique obtenus par Bowie. Pour le calcul, ces auteurs divisent la contrainte circonférentielle par la contrainte globale appliquée. Pour une plaque comportant un trou elliptique, Inglis utilise la formule du facteur de concentration de contraintes suivante :

$$K = 1 + \sqrt{a/\rho} \dots (2)$$

Avec la profondeur de l'entaille et  $\rho$  rayon d'entaille. Cet auteur obtient des facteurs de concentration de contraintes identiques à ceux de Baratta et Bowie. Dans le cas d'une plaque de largeur finie et une entaille de bord en U, Isida a proposé un facteur de correction permettant le passage du cas d'une plaque infinie à celui d'une plaque de largeur finie.

La forme générale du facteur de concentration de contraintes peut s'écrire selon la forme :

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_x} \dots (3)$$

où,  $K_t$ ,  $\sigma_{\max}$  et  $\sigma_g$  sont respectivement le facteur de concentration de contraintes, la contrainte élastique maximale au fond d'entaille et la contrainte globale à laquelle la structure est soumise.

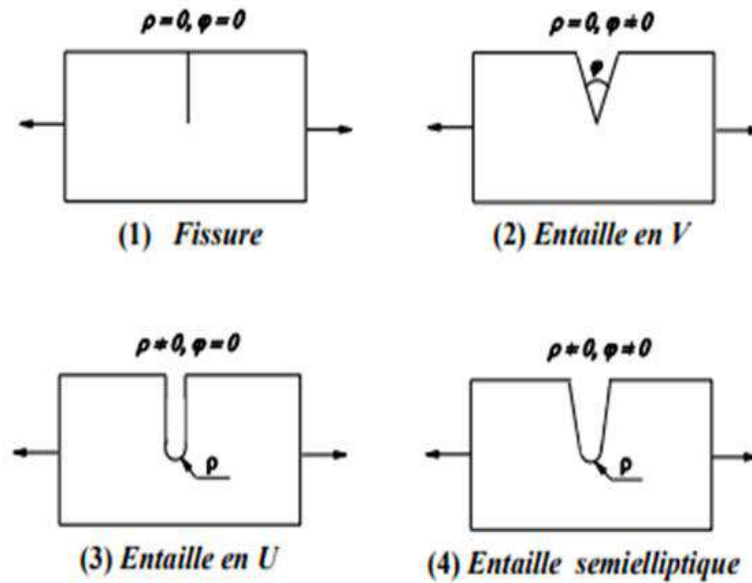


Figure I. 12 : Différents paramètres géométriques définissant une entaille simple [3]

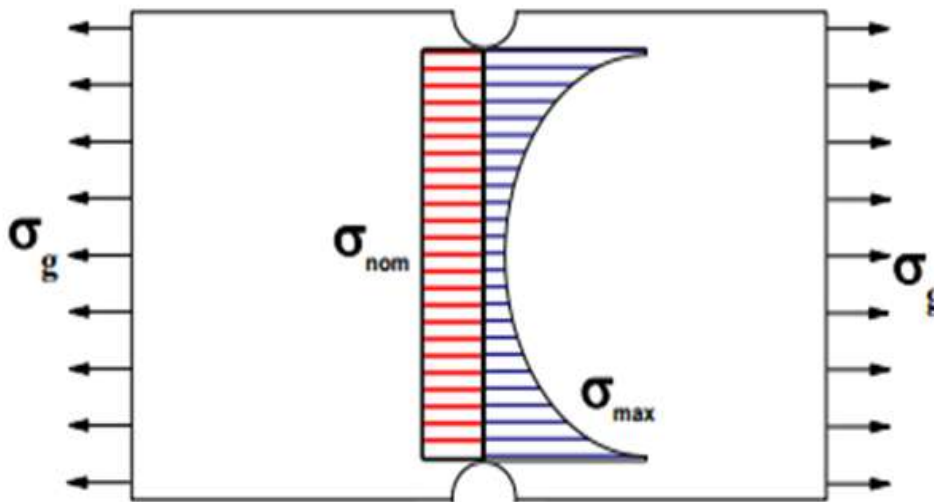


Figure I. 13 : Définition de la contrainte globale, maximale et nominale[3]

le facteur de concentration de contrainte élastique est relié à la contrainte nominale  $\sigma_{nom}$  selon la relation suivante :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \dots (4)$$

$K_t$  : facteur de concentration de contraintes

La définition de la contrainte maximale, de la contrainte globale et de la contrainte nominale est donnée en (Figure I. 13)

Les contraintes maximales  $\sigma_{max}$  et  $\tau_{max}$  sont déterminées numériquement par éléments finis ou expérimentalement par la méthode de la photoélasticimétrie. Les contraintes nominales  $\sigma_{nom}$  et  $\tau_{nom}$  sont données par les équations de la résistance des matériaux. Ces contraintes sont déterminées mathématiquement au moyen des équations établies à la suite des travaux de Neuber (formule de Peterson). Smith, (1978) indique que la propagation de la fissure sera gérée uniquement par la contrainte nominale.

L'apparition de fissure non propageante, correspond à un niveau de contrainte dans un tout petit volume, de sorte que le facteur d'intensité de contraintes associé à cette fissure ne facilite pas la propagation. Le fait qu'une fissure se propage, dépend à la fois du chargement nominal et de l'acuité de l'entaille. Plus  $K_t$  est élevé et plus la contrainte nominale doit être élevée pour participer à l'amorçage.[3]

## I.11. Conclusion

Dans ce chapitre on a concentré notre recherche sur l'historique du phénomène de la rupture et les études théoriques développées, pour bien comprendre et minimiser les conséquences dramatiques du problème des endommagements des équipements mécaniques dans le secteur de l'industrie pétrolière.

L'explication scientifique du mode de la mécanique de rupture est caractérisée par deux approches :

La première approche, la plus classique, repose sur la limite d'élasticité du matériau  $\sigma_E$  ;

La deuxième approche, s'appuie sur le concept de ténacité  $K_C$  issu de la mécanique linéaire de la rupture (MLR).

D'un point de vue théorique, l'analyse asymptotique en mécanique linéaire de la rupture a défini les paramètres décrivant la rupture. Nous avons rappelé les principaux travaux relatifs à la détermination du champ de contraintes au voisinage d'une entaille et le facteur de concentration de contraintes dans le cas élastique.

Nous avons présenté les principaux paramètres et facteurs liés à la détermination du champ de contraintes au voisinage d'une entaille, et nous constatons que pour les défauts concernant différents types d'entailles des fissures, la distribution des contraintes peut être approximativement caractérisée la géométrie de la fissure et l'acuité d'entaille et le facteur d'intensité de contrainte

On a constaté que le phénomène de la corrosion et l'influence des propriétés mécaniques des matériaux est très présent comme facteur provocant ou l'arrêt de la propagation des fissures et qui favorise la diminution et l'augmentation du facteur de la ténacité.

# ***CHAPITRE II***

*Technique et Méthodes de Réparation des  
Equipements de Productions Pétrolières*

## **II.1. Introduction**

Beaucoup d'équipements pétrolière sont exposés à des différents endommagements qui réduisent leur performance et rendements, et qui provoques des arrêts brutal ce qui peut entrainent à des accidents dramatique. Dans ce chapitre on va présenter quelque défaillance qui touche les équipements (Réservoir de stockage, Pompes centrifuges, Pipe-Line) avec les différentes technique et méthodes de réparations.

## **II.2. Réservoirs de stockage des produits pétroliers**

Les réservoirs sont des équipements stratégiques de stockage les plus utilisés dans de nombreuses industries, notamment dans les industries pétrolières, gazières Ils peuvent être de forme cylindrique, sphérique, horizontaux ou verticaux, en fonction de la nature du produit stockée, son environnement et son utilisation.

Les caractéristiques techniques d'un réservoir de stockage de la brute grande capacité positionnée au niveau de la région EL MERK sont les suivants (FigureII. 1) :

Caractéristiques technique d'un réservoir de stockage 14000m<sup>3</sup>

Les volumes de stockage de brut utilisé sont compris entre (14000 & 51200) m<sup>3</sup>

### Données

Diamètre du réservoir	57 m
Hauteur du réservoir	12 m
Epaisseur	(11,14,21)mm
Volume	14000 m <sup>3</sup>
Température	60 c°
Matériaux	acier S355
Limite d'élasticité	235 MPa
Résistance à la traction	340 MPa
Coefficient de poisson	0.3
Densité de calcul	0.98
Masse volumique	7850 kg /m <sup>2</sup>



Figure II. 1 : Réservoir de stockage grand capacité à toit flottant (EL MERK/OURHOOD)

### II.3. Réservoir et composants

Les réservoirs métalliques verticaux sont classés en 3 types :

- 1-Réservoir à toit fixe
- 2-Réservoir à toit flottant
- 3-Réservoir à toit fixe et un écran flottant

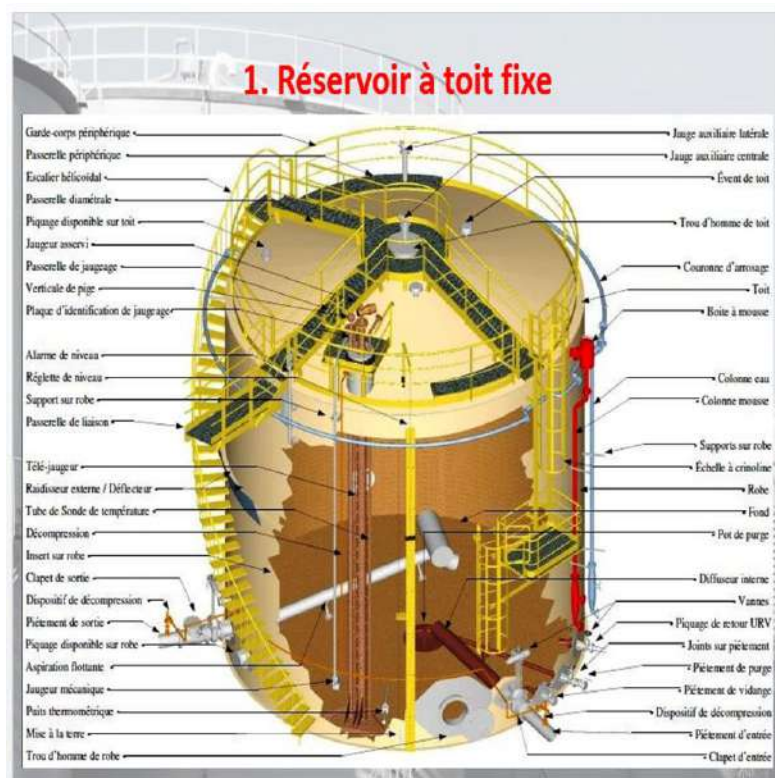


Figure II. 2 : Réservoir de stockage grand capacité à toit fixe [10]

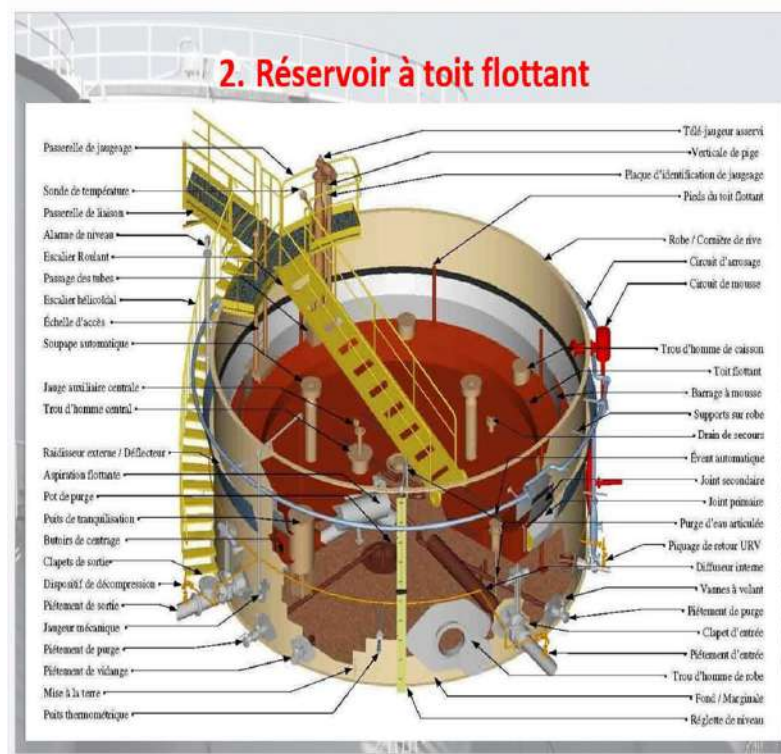


Figure II. 3 : Réservoir de stockage grand capacité à toit flottant [10]

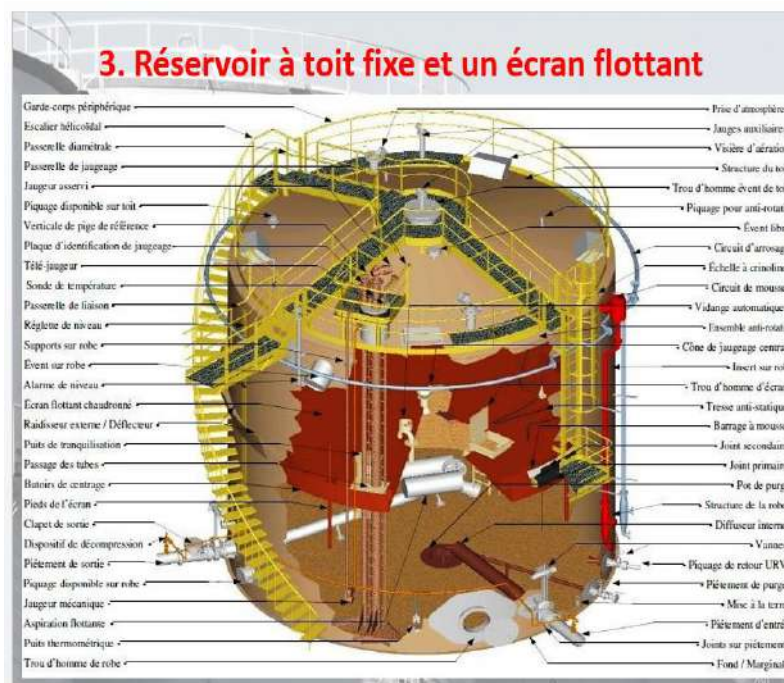


Figure II. 4 : Réservoir de stockage grand capacité à écran flottant [10]



## **II.4. Les causes entraînant la provocation de la corrosion & l'endommagement des réservoirs**

Les réservoirs de stockage industriels et leur contenu constituent des biens de valeur qui ont besoin d'être protégés.

En raison de conditions météorologiques défavorables ou de la condensation, l'humidité peut s'accumuler au niveau de la liaison au sol ou du chemin de roulement sous la base du réservoir et entraîner la corrosion de la base du réservoir, l'apparition de fuites, et éventuellement, la défaillance de ce dernier. Cependant, ces phénomènes s'étendent bien plus loin que le simple coût du réservoir et de son contenu.

La corrosion de la base d'un réservoir est souvent causée par les raisons suivantes :

- tassement du réservoir de stockage ;
- immersion par intermittence dans l'eau de pluie ;
- trous localisés entre le réservoir et sa base ;
- isolation saturée provoquant de la corrosion sous isolation localisée sévère ;
- défaillance des joints en mastic ;
- fissuration et retrait des applications bitumineuses ;
- systèmes de gicleurs d'incendie créant une accumulation d'eau autour de la base ;
- systèmes d'inondation de cuve ;
- expansion et contraction du réservoir.

La corrosion est l'un des principaux modes de dégradation des réservoirs de stockage, elle peut être de nature électrochimique, bactérienne et peut affecter l'ensemble des composants d'un réservoir de stockage tant en interne qu'en externe. Par ailleurs, la corrosion peut être soit localisée soit généralisée. La corrosion généralisée associée à la corrosion par piqûres peut se produire à l'intérieur ou à l'extérieur. Alors que des piqûres isolées peuvent créer des fuites mineures, la concentration d'un grand nombre de piqûres ou une zone de corrosion localisée, peuvent provoquer une fuite majeure.

La corrosion interne peut résulter de :

- présence de substances agressives ou polluantes dans le produit stocké (parfois en association avec d'autres conditions). Un exemple est la corrosion du ciel du réservoir pouvant affecter la partie interne du toit et de la robe du réservoir du fait de la présence de composés soufrés et de vapeur d'eau ;
- entrée et accumulation d'eau dans le réservoir résultant de la respiration du réservoir en raison de différences de température et condensation de vapeur d'eau, présence d'eau dans le produit stocké, ou entrée d'eau de pluie par le joint des toits flottants ;
- qualité inadéquate des matériaux d'apport des soudures.

La corrosion externe peut résulter de :

- mauvaise qualité de la couche supérieure de l'assise du réservoir : les polluants dans la couche supérieure de la fondation tels que de l'argile, des pierres, des cendres, ou d'autres matériaux acérés peuvent conduire à une zone de concentration d'oxygène aux points de contact du fond du réservoir. Les petites zones de contact entre le fond et les polluants forment une anode alors que le reste du fond forme une cathode, d'où une corrosion ponctuelle au point de contact ;
- entrée d'eau de pluie par la pénétration et/ou capillarité du fait d'un mauvais contact entre la tôle marginale et l'assise du réservoir ;
- accumulation d'eau de pluie au niveau de la marginale, des cornières sur les viroles ou sur les tôles de toit ;
- délamination de la tôle de marginale particulièrement dans des secteurs où de l'eau et des débris s'accumulent autour de la base du réservoir ;
- qualité inadéquate des matériaux d'apport des soudures des plaques annulaires et des tôles de fond ;
- restes de calamine sur les plaques ;
- température du produit stocké qui peut accroître la vitesse de la corrosion sous calorifuge ;
- agressivité des conditions ambiantes (atmosphères agricoles, industrielles, maritimes, tropicales, ...), fonction de l'humidité relative, de la teneur en chlorures ou en espèces chimiques provenant de la pollution (SO<sub>2</sub> en particulier), de la température, du vent, de la pluie, etc.[11]

### **II.4.1. Cas d'endommagement et de réparation des réservoirs**

1-Le renforcement de l'étanchéité par un composite sous forme d'un joint de garniture sur la base d'un réservoir de stockage va nous permettre d'éviter la corrosion par fissures due aux contraintes. [11]

Situation de l'application :

Joint sur la base d'un réservoir de stockage en acier inoxydable.

Problème :

Les ingénieurs des matériaux sur place ont souligné le fait qu'un environnement avec de la corrosion par fissures due aux contraintes pouvait être créé si de l'eau s'infiltrait sous le fond du réservoir.

Substrat :

Acier inoxydable et béton



Figure II. 5: Béton de fondation porte la structure du réservoir[11]

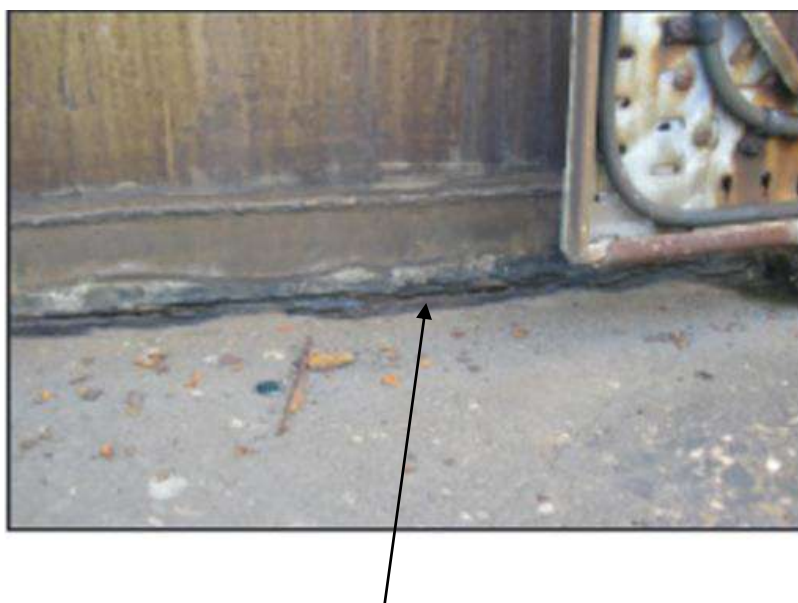


Figure II. 6: Fissure sur la base du réservoir[11]



Figure II. 7: Fissure réparée et étanchéité assurée du bas du réservoir[11]



Figure II. 8 Application terminée pour deux réservoir [11]

2-La protection contre la corrosion pour les réserves de stockage soit les surfaces extérieure ou intérieure exige la nécessité de commencer par le sablage pour les surfaces corrodées ce qui va nous permettre de réaliser l'opération de revêtement.[11]

Situation de l'application :

Revêtement extérieur d'un réservoir de stockage de pétrole brut d'une capacité de 1000 barils

Problème :

Des multitudes de facteurs, tels que l'abrasion due au sable, l'air salin, la pollution en provenance des gaz sulfureux résiduels et d'autres composants chimiques, a contribué à l'érosion/ corrosion accélérée de l'extérieur du réservoir de stockage comme il est présenté sur (FigureII. 9).

Substrat :

Acier carbone

Le système de revêtement après l'opération du sablage permet une protection du réservoir, fournissant ainsi la résistance chimique nécessaire à l'abrasion



Figure II. 9 : Etat de surface extérieur du réservoir dégradé [11]



Figure II. 10: Opération de sablage sur la zone corrodée du réservoir[11]



Figure II. 11: La protection extérieure du réservoir par l'opération de pulvérisation d'une résine à base du polymère[11]



Figure II. 12: Application réalisé avec finition[11]

### 3-Soudure à froid

Le soudage à froid c'est le collage des plaques métallique sur les endroits endommagé par l'utilisation d'un composite à base d'époxy sans l'intervention de la chaleur. [11]

Situation de l'application :

Gicleur d'incendie de 5 mètres de diamètre, réservoir de stockage d'eau.

Problème :

Le réservoir souffrait de corrosion, qui avait affecté l'épaisseur de sa paroi. Des perforations sont alors apparues à plusieurs parties du réservoir, causant des fuites. Comme ce dernier stockait de l'eau utilisée pour lutter contre les incendies, il devait alors demeurer structurellement intact.

Substrat :

Acier carbone



Figure II. 13 : Bac de stockage a réparé [11]

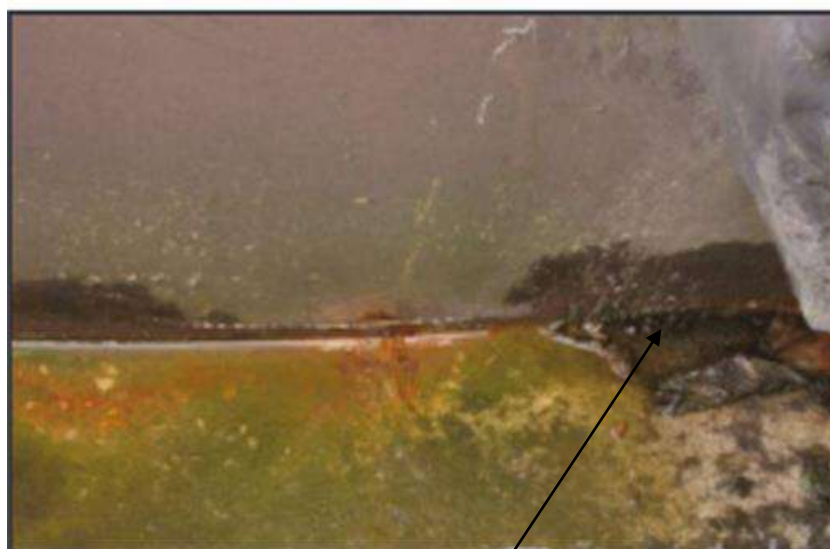


Figure II. 14 : Cote endommagée par la corrosion [11]





Figure II. 15: Composite à base d'époxy [11]



Figure II. 16: Collage par plaques métallique en acier anti-usure à froid [11]

#### 4-Problèmes :

- Infiltration d'eau sous le bac de stockage de brut (Figure II. 2)
- Dégradation des bétons sur la partie inférieure du socle (Figure II. 18)



Figure II. 17 : Infiltration d'eau [11]



Figure II. 18 : Dégradation du béton [11]

#### 4.1-Solution et réparation :

- Retrait du bitume qui fait office de joint sous le bac ;
- remplacement de celui-ci par un joint polyéthylène ;
- Réparation des bétons après avoir traité les armatures ;
- Préparation des surfaces à protéger.



Figure II. 19 : Bitume de revêtement [10]



Figure II. 20 : Joint polyéthylène [10]



FigureII. 21: Protection avec propriétés Imperméabilisantes [10]



FigureII. 22: Revêtement liquide appliqué à froid [10]

## **II.5. les pompes centrifuge**

Les pompes centrifuges sont les plus courantes dans l'industrie chimique au sens large, du fait de leur simplicité de conception, de leur cout généralement moindre qu'une pompe volumétrique équivalente et de leur aptitude à transporter des liquides même chargés (de particules solides).

Une pompe centrifuge est une machine rotative qui pompe un liquide en le forçant au travers d'une roue à et une hélice appelée impulseur (souvent nommée improprement turbine). C'est le type de pompe industrielle le plus commun.



Figure II. 23: Pompe centrifuge

### **II.5.1. Les organes principaux d'une pompe centrifuge**

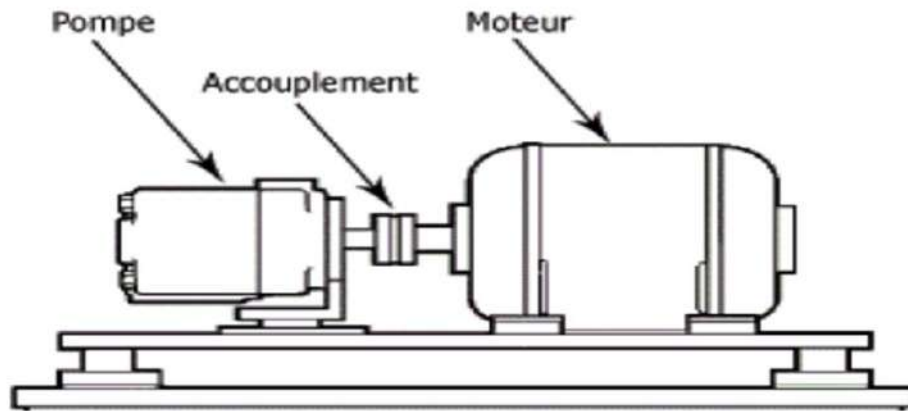


Figure II. 24 : Présentation des organes principaux d'une pompe centrifuge

### **II.6. L'effet défectueux de la corrosion & l'érosion sur la surface interne de la pompe centrifuge**

La surface intérieure du corps de la pompe centrifuge est le plus souvent touchée par les contraintes suivant :

La turbulence dans le liquide provoque un bombardement de la surface de contact de la pompe, accélérant ainsi l'érosion et la corrosion de la surface métallique.



Figure II. 25 : Effets typique de l'érosion & la corrosion dans une pompe centrifuge



Figure II. 26 : Dommages causés par la corrosion et la cavitation

## **II.7. Application adéquate de réparation par l'époxy de polymère**

- L'opération de sablage doit être réalisée avant chaque revêtement ;
- L'opération de revêtement par l'utilisation d'un composite à base d'époxy de polymère nécessite deux couches ;
- Sont appliquées au pinceau à l'applicateur ou pistolet en épaisseur recommandée de 250 micron par couche ;
- Les caractéristiques théologiques du produit assurent un fini de surface parfaitement lisse.



Figure II. 28 : Surface intérieure de la pompe centrifuge réparée



Figure II. 27 : Réparation de la surface de contact intérieure par un opérateur qualifié



Figure II. 29 : Rénovation et réparation finalisée de la surface de contact d'une pompe centrifuge

## **II.8. Avantages bénéficiés de la réparation et la protection des pompes centrifuge par l'alliage dupolymère**

Minimise l'effet de l'abrasion, l'érosion-corrosion ;  
Améliore la performance ;  
Améliore l'efficacité de 3 à 8% pour les pompes neuves ;  
Améliore l'efficacité de 20 % pour les pompes déjà en service ;  
Prolongation durée de vie de 5 ans précédemment, passe à 15 ans.

## **II.9. Pipe-Line:**

Le pipeline est un mode de transport, par lequel peuvent transporter le pétrole et autres produits de l'hydrocarbure sûr de grandes distances, le transport du brut se réalise à l'intérieur des canalisations circulaires reliées par des accessoires sous pression, constituant un réseau des gros tuyaux métallique et des stations de pompage.



Figure II. 30: Station de pompage pétrolière[10]

## **II.10. Méthodes de réparation pour les pipe-lines**

Des différents endommagements tell que la corrosion, érosion, dommage mécanique touchent les grand line des canalisations et pipeline transportant le pétrole, gaz naturel et l'eau, produits chimique.

Durant de nombreuses années, les seules solutions crédibles pour les pipelines endommagées étaient de remplacer par du neuf ou de souder une nouvelle section. Ces procédures imposent généralement des arrêts de production. De plus, le travail à chaud requit lors du remplacement en interdit son utilisation dans les zones dangereuses. Enfin, les problèmes métallurgiques causés par la soudure ajoutent des inconvénients à cette solution compliquée et onéreuse.[11]

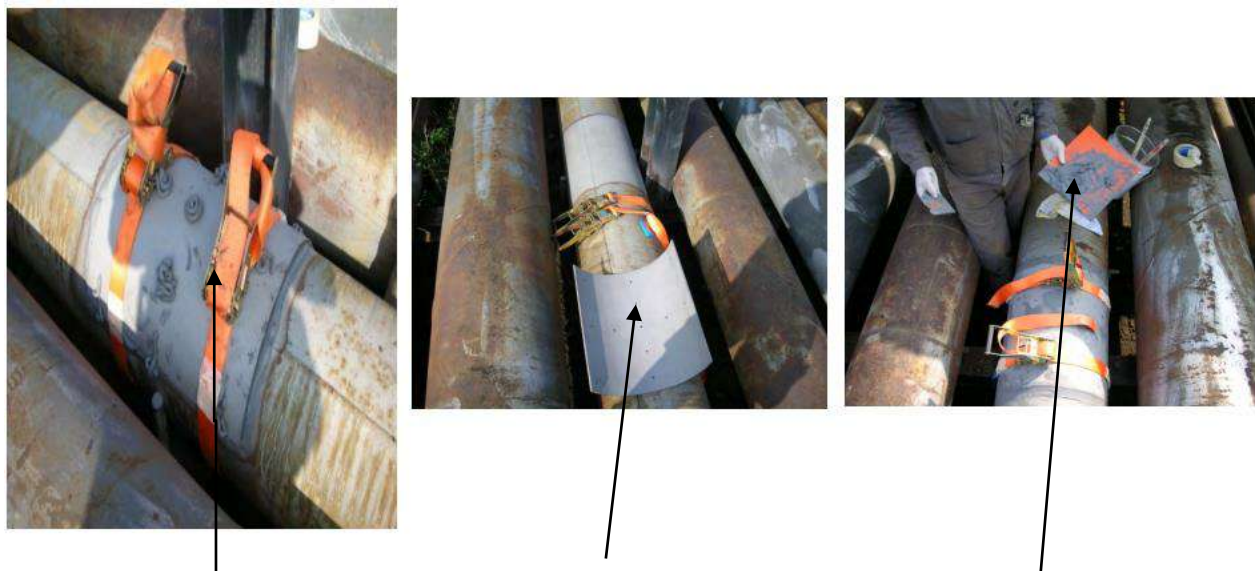
## **II.11. Collage des plaques métallique anti-usures**

L'opération de collage des plaques anti-usure à froid sur l'endroit attaqué par la corrosion des pipelines est devenue très favorisée par les compagnies pétrolières suite au facteur de sécurité qui est très élevé et l'impact positif sur l'environnement.

### **II.11.1. Cas pratique de réparation des Pipe-lines**

Problème : Pipelines d'essence, attaqué par la corrosion, entrainant des fuites.

La solution : Collage des plaques en acier anti-usure sur la conduite d'essence



Collier de serrage Plaque en acier anti-usure Epoxy à base du polymère

Figure II. 31: Protection & réparation sur la conduite d'essence par collage à froid

## **II.11.2. Remplacement d'un support de Pipeline**

1-La solution : Dégagement du pipeline de son support, décapage de la surface, puis collage d'un nouveau support directement sur le pipeline.

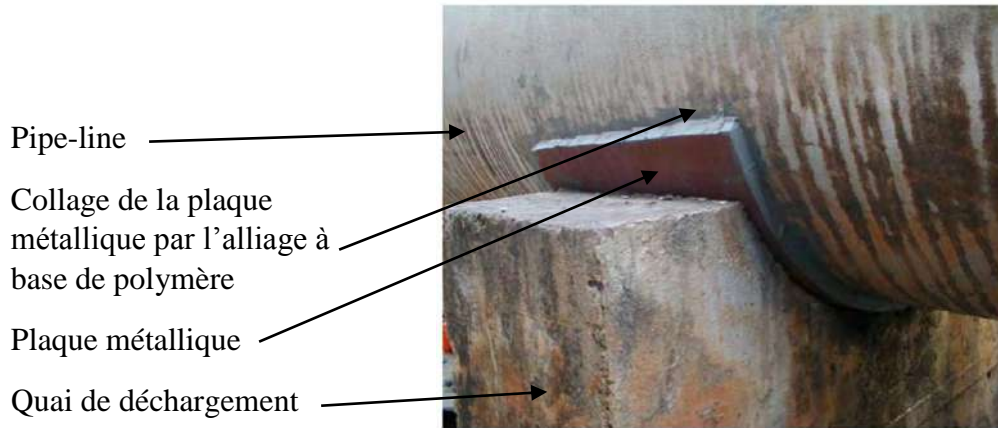


Figure II. 32: Renforcement & protection (Pipe-line pétrolier)[11]

2-Problème : des endroits sur la surface extérieure d'un Pipeline attaqué par la corrosion

La solution : Pipe réparé et conforté par des plaques soudées à froid à l'endroit des perforations est des zones critiques (FigureII. 33) [10]



Figure II. 33: Réparation et renforcement des zones endommagé par des plaques soudées à froid [10]

## **II.12. Méthode pratique de réparation & protection des Pipelines pétroliers contre la corrosion**

- ✓ Identification les endroits endommagés sur le Pipeline ;
- ✓ Effectuer l'opération de sablage sur les surfaces du Pipeline attaquées par la corrosion ;
- ✓ Préparation de l'alliage de l'époxy à base de polymère pour le collage à froid ;
- ✓ Rebouchage la profondeur des percements apparaît sur le Pipeline par le Patch composite ;
- ✓ Préparation des plaques métallique anti-usure ;



- ✓ Réaliser l'opération de sablage sur la surface de contact de la plaque métallique ;
- ✓ couvrir les deux surfaces de contact du Pipeline et la plaque métallique par l'époxy de polymère ;
- ✓ Assurer la fixation complète de la plaque sur le pipeline par deux colliers de serrage.

### **II.12.1. Réparation par Patch composite**

Problème : Cas d'une pipe d'eau attaquées par une corrosion interne due au contact avec une eau fortement saline.

La solution : Application du Patch composite pour recharger les zones affaiblies et rebouchages les percements.



Figure II. 34: Rebouchage des percements par Patch composite[10]

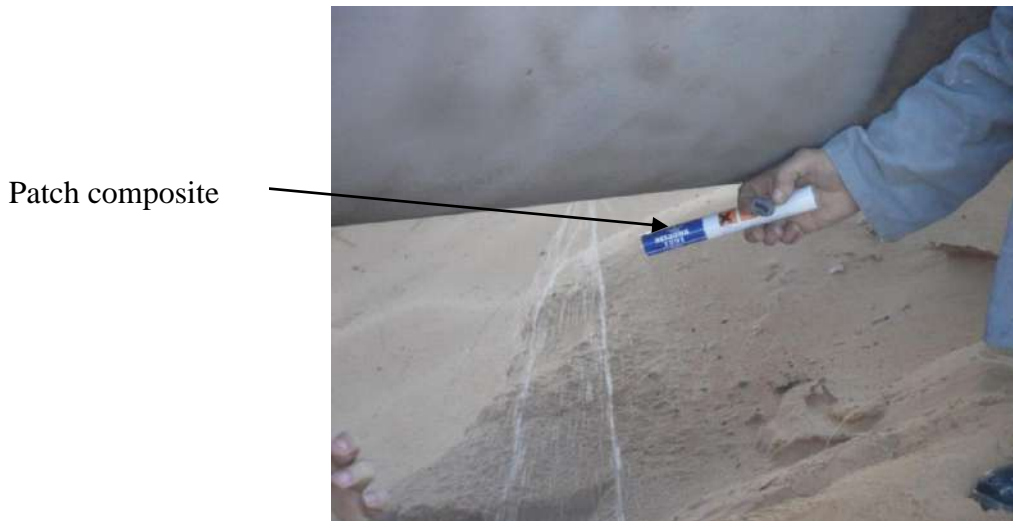


Figure II. 35: Fuite d'eau due à la corrosion et l'eau saline[10]

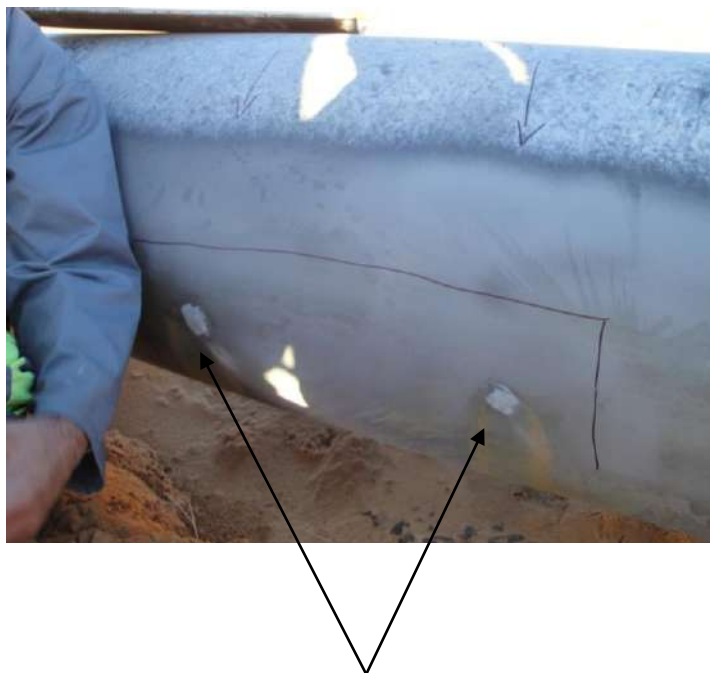


Figure II. 36: Sablage & percements rechargés par Patch composite avant le collage de la plaque métallique à froid [10]

## **II.13. Avantages de la réalisation des réparations et la protection des pipelines par une gamme complète de polymères**

- ✓ Effectuez des réparations sur site ;
- ✓ Réduisez les temps d'immobilisation ;
- ✓ Évitez des remplacements coûteux ;
- ✓ Améliorez la durée de vie et les performances de vos équipements.

## **II.14. Conclusion**

Les performances des réparations par les composites permettent désormais aux industries d'obtenir une réparation normalisée, qui est adaptée et permanente.

Les bénéfices sont évidents :

Réduction des arrêts de production, réduction du temps d'installation et solutions long terme, se résumant ainsi en une solution rentable pour les propriétaires d'équipements et les opérateurs.

Les réparations possibles par l'époxy à base du polymère comprenaient une solution permanente et efficace avec un revêtement par soudure à froid de la zone affectée.

La solution nécessitait moins de 29 000 euros de produits et de main d'œuvre et a été effectuée en 3 jours.

Le revêtement par soudure aurait entraîné un coût de 72 000 euros de produits et de main d'œuvre, mais surtout, elle aurait été effectuée en 10 jours.

Les pertes de production quotidiennes étant de 7 millions d'euros, la réparation les différentes gammes de l'alliage de polymère a permis aux stations de pompage et les raffineries pétrolières d'économiser plus de 47 millions d'euros.

# ***CHAPITRE III***

*Simulation et Méthode Numérique*

### III.1. Introduction

Depuis son introduction la méthode numérique basée sur la méthode des éléments finis étendue, développée à NorthwesternUniversity, est largement utilisée dans la résolution des problèmes de mécanique de la rupture.

Le terme original eXtendedFiniteElement Method (XFEM) est introduit par Moes, Dolbow et Belytschko . Qui ont développé cette méthode en proposant l'introduction d'une fonction échelon pour enrichir les éléments complètement séparés par une fissure.

Depuis, la méthode a été continuellement améliorée et développée, pour l'analyse de la bifurcation de la fissure ou pour la modélisation tri-dimensionnelle.

Une description de l'implémentation numérique de la méthode des éléments finis étendue, pour le cas statique a été également publiée par Sukumar et Prévost.

Des calculs tridimensionnels par éléments finis ont ensuite été réalisés avec le code de calcul Abaqus/CAE™. La simulation numérique du comportement des éprouvettes normalisées CT(Compact Tension) sollicitées en mode I ont été étudiés.

Un des avantages de cette géométrie d'éprouvette est l'obtention de la formule analytique du facteur d'intensité des contraintes en mode d'ouverture donnée par Tada.

Si le comportement de ces éprouvettes en cours d'essai est parfaitement élastique, la détermination de la ténacité se fait à partir de la mesure de la force à rupture ; valeur facilement identifiable du fait d'une instabilité de la propagation de fissure lorsque l'échantillon est sollicité en force.[9]

### III.2. Présentation du logiciel ABAQUS/CAE

Il faut savoir que les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Les plus utilisés sont Nastran, Catia, ABAQUS et SolidWorks. Tous ces logiciels effectuent les mêmes tâches, c'est à dire qu'ils génèrent des structures, ses caractéristiques et celles du problème étudié, ensuite ils calculent le devenir de cette structure (déformations, ruptures, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables Abaqus/CAE™ est un programme qui traite des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statiques et dynamiques, des problèmes non linéaire, des problèmes thermiques etc...

La résolution complète d'un calcul numérique s'effectue après un passage successif dans les modules suivants :

Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job (pour lancer le calcul) . Dans le code de calcul Abaqus le fichier de données décrit les géométries, les matériaux, les conditions aux limites avec une extension (.inp) et le fichier de résultats décrivent les contours et les courbes résultats avec l'extension (.odb). Comme le présent(FigureIII.1) ABAQUS/CAE est divisé en unités fonctionnelles appelés modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

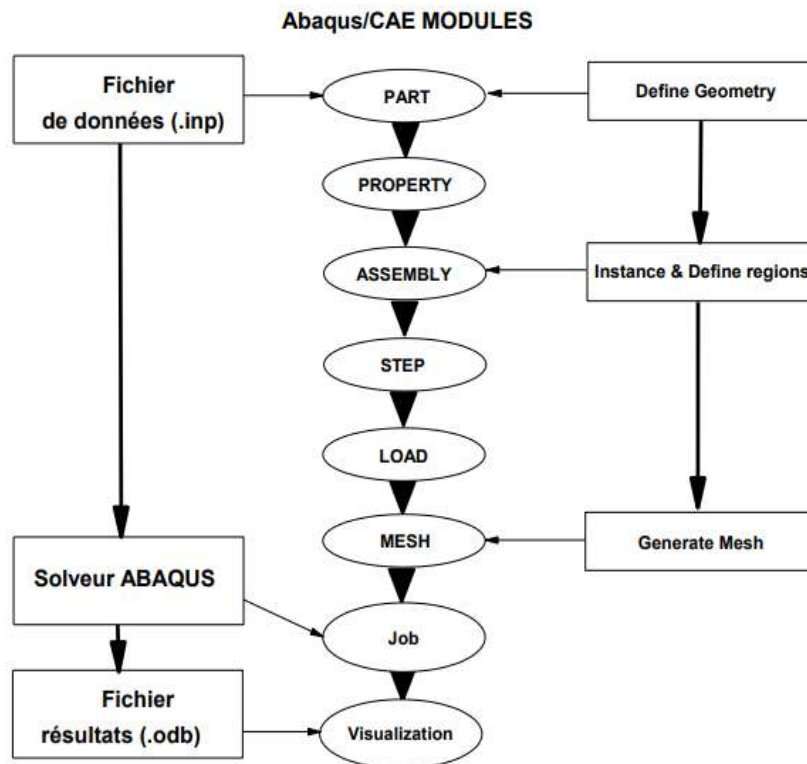


Figure III. 1 : Étapes à suivre pour la programmation

### III.3. Etude de conception

#### III.3.1. Géométrie du réservoir à étudier

L'étude de la conception du réservoir par le système (Abaqus /CAE™) est très importante pour permettre d'analyser la géométrie générale du bac de stockage et définir la zone des fissures à réparer.

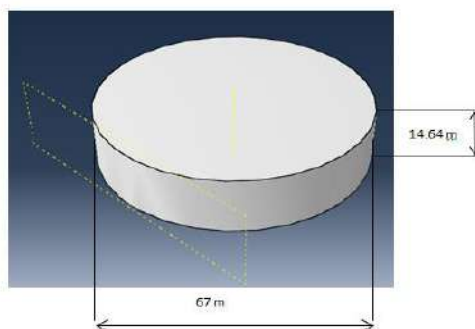


Figure III. 2 : Géométrie et dimensions du réservoir

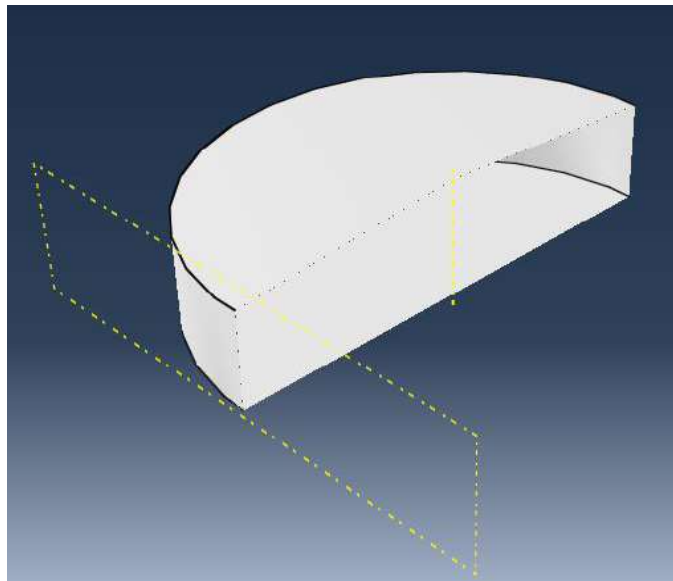


Figure III. 3: Coupe de présentation

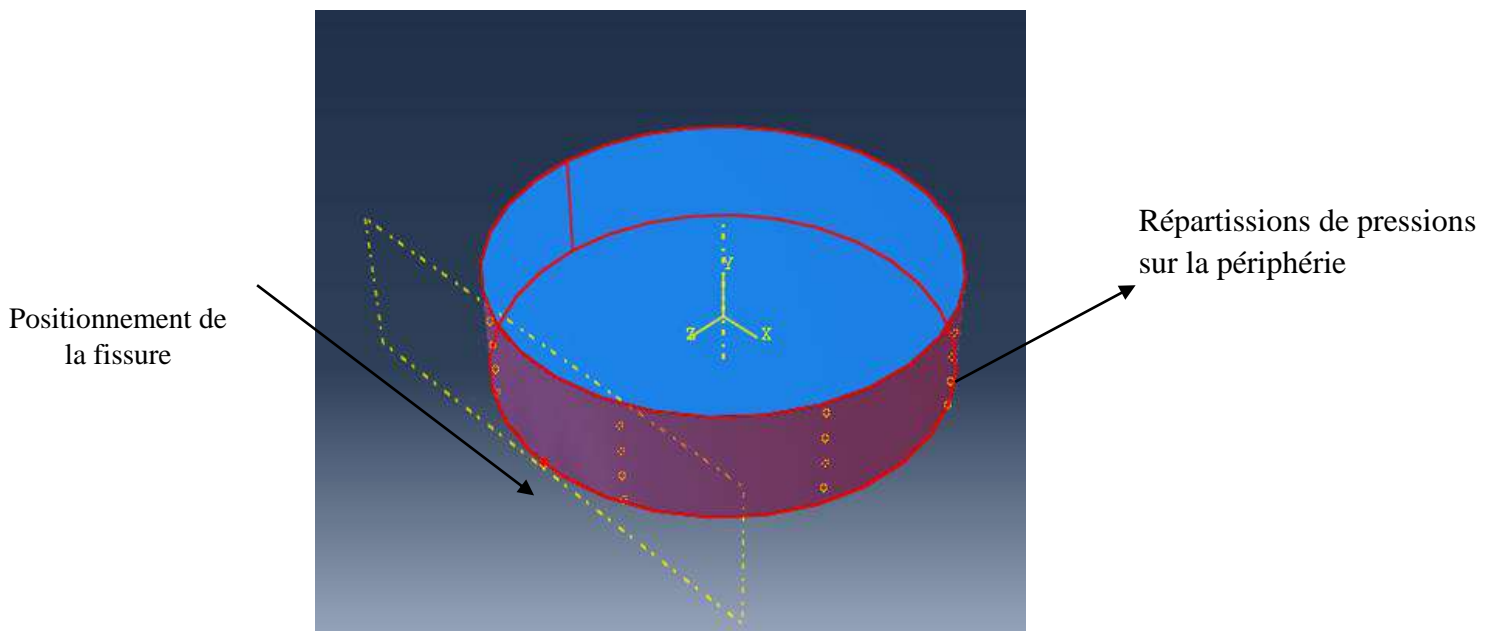


Figure III. 4 : Répartitions des contraintes sur la paroi extérieur

### III.4. Calcule de la pression interne

La plupart des endommagements survenant du bas des réservoirs au niveau de la robe de la paroi sous l'influence du poids du brut, la pression et la corrosion externe. Cas pratique :

Réservoir de stockage pétrolier grand capacité à toit flottant double (51200 m<sup>3</sup>)

Lieu : EL MERK (Hassi-Messaoud)

Calcule de la pression interne du bas de réservoir :

Spécifications techniques de bac 51200 m<sup>3</sup> :

- Type de réservoir : à toit flottant double
- Produit stocké : brut
- Densité brut : 0.81
- Pression ATM : 101325
- Température : 70 C°
- Température : - 17 C°
- Limite d'élasticité : 235 MPa
- Résistance à la traction : 340 Mpa
- Volume de stockage : 51200 m<sup>3</sup>
- Poids du toit : 320000 kg
- Surface de contact : 3450 m<sup>2</sup>
- Diamètre intérieur du réservoir : 66.75 mètre
- Hauteur de réservoir : 14.64 mètre
- Hauteur de brut : 9 mètre
- Matière du métal : ASTM A 283 GR C
- Epaisseur de la robe (viroles) V1 :23.5mm, V2 :19.5, V3 :16.5,  
(V4-V5-V6):10mm

Tableau III. 1 : Composition chimique de l'acier au carbone A 283 GR C

Normes ASTM

ASTM	Nuance Grade	Composition chimique %						
		C	Mn	P maxi	S maxi	Si	Ni	Cr
A 283	B	0.17	0.90	0.0035	0.04	0.40	-	-
	C	0.24	0.90	0.0035	0.04	0.40	-	-
	D	0.27	0.90	0.0035	0.04	0.40	-	-



Tableau III. 2 : Caractéristique mécanique de l’acier au carbone A 283 GR C

Normes ASTM

ASTM	Nuance Grade	Caractéristique mécanique				
		Résistance/Tensile strength		Limite élastique/ Yield strength		Allong /Elong g
		mini-MPa	mini-Ksi	mini-MPa	mini-Ksi	
A 283	B	345 - 450	50 – 65	185	27	28
	C	380 – 515	55 – 75	205	30	25
	D	415 – 550	60 – 80	230	33	23

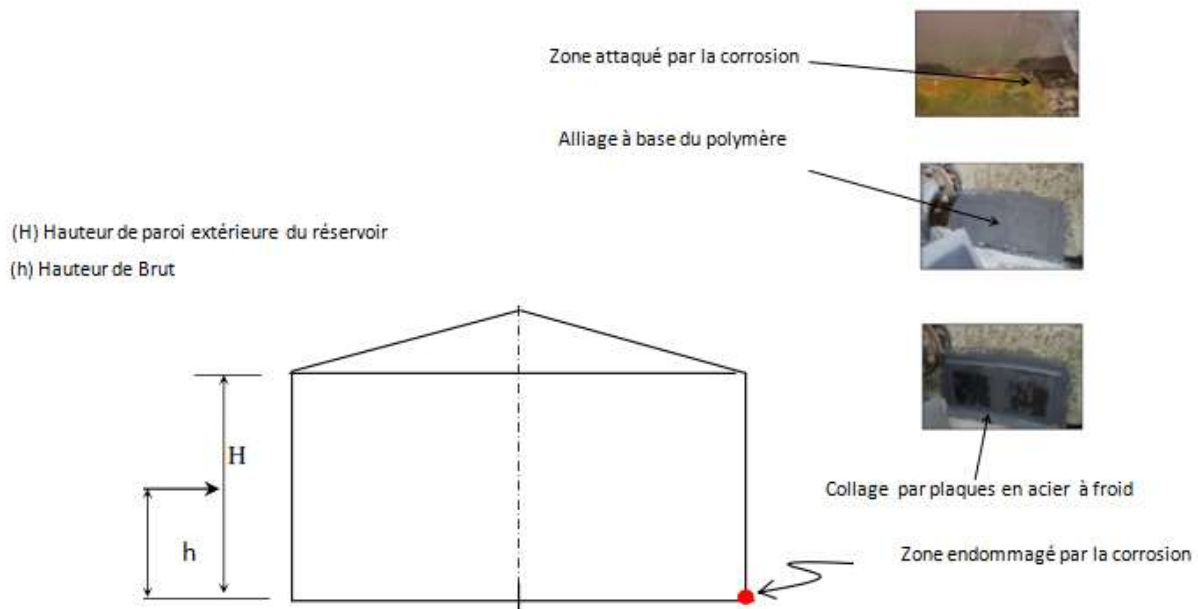


Figure III. 5: Schémas descriptive d’un réservoir de stockage

Calcule la masse volumique de brut :

Densité brut = masse volumique brut/ masse volumique d’eau

0.81= masse volumique brut/ 1000

==> masse volumique brut = 0.81x 1000ρ **brut** = 810 kg/m<sup>3</sup>

La pression interne = la pression ATM + (poids du toit x 9.81) / [(surface de contact toit brut)]

+ [hauteur de brut x la masse volumique x 9.81]

= 101325 + (320000 x 9.81) / 3450 + (9 x 810 x 9.81)

= 101325 + 910 + 7151

Pression interne = 173750 Pa = 0.173750 MPa = 1.7375 Bar

## III.5. Etude de simulation

### III.5.1. Calcul et résultat

L'étude de simulation appliqué par le système (Abaqus /CAE™) va nous permettre de visualiser et définir les différentes contraintes (pression ; déplacements) exercé sur la zone endommagée suivant les directions (x ; y ; z).

Dans le cadre de cette étude en va stopper la propagation de la fissure positionnée du bas du réservoir par la méthode de soudage à froid en appliquant les étapes suivantes :

- ✓ Sablage de la zone endommagé ;
- ✓ Préparation de l'alliage d'époxy à base de polymère pour applique le collage de la plaque métallique sur les fissures ;
- ✓ Rebouchage des percements par Patch composite ;
- ✓ Choisir les plaqués métalliques pour renforcement et couvrir la zone endommagée ;
- ✓ Couvrir la zone fissurée par l'alliage de polymère avec la plaque métallique ;
- ✓ Fixation de la plaque métallique sur la surface fissurée par serrage

Bac de stockage:

Module de Young : 210000 Mpa

Coefficient de poisson : 0.3

Densité : 7850

Epaisseur : 23.5m

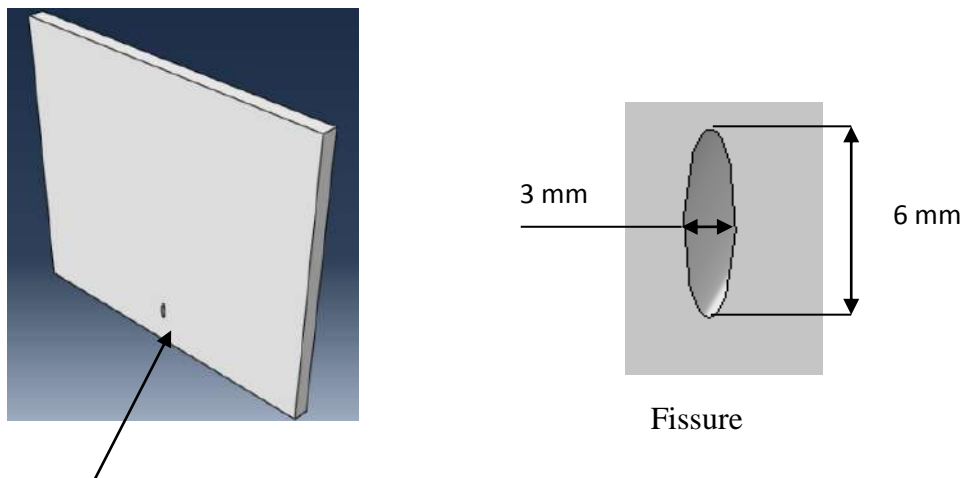


Figure III.6 : Partie du réservoir avec la fissure à réparer

Plaque métallique :

Matière : acier au carbone

Dimension : 127mm [suivant l'axe (x)] x 127mm[suivant l'axe (Y)]

Epaisseur : 4mm

Coefficient de poisson : 0.3

Module de Young :210000 Mpa

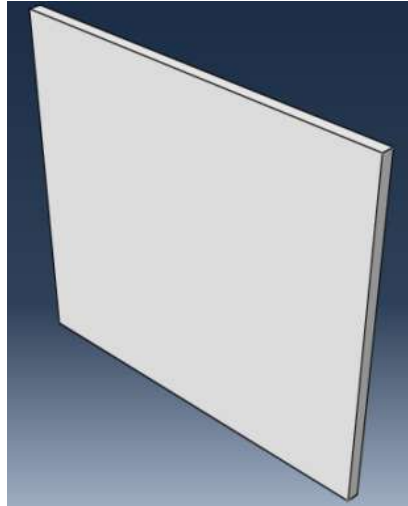


Figure III.7:Plaque métallique pour renforcement

Patch composite:

Dimension : 127 mm [suivant l'axe (x)] x 127mm [suivant l'axe (Y)]

Epaisseur : 4mm

Coefficient de poisson : 0.3

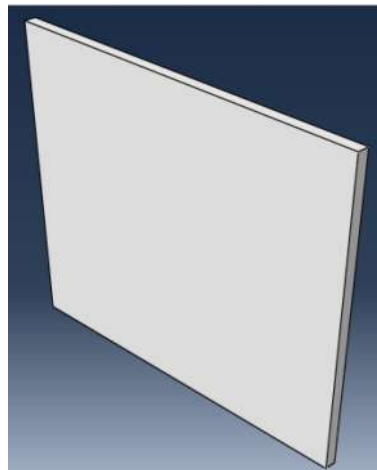


Figure III.8: Patch composite à base de polymère

### III.5.2. L'opération d'assemblage

Après l'opération d'assemblage la Figure III.1 montre la forme et l'adhésion de la plaque avec le patch composite couvrant la fissure sur la paroi extérieure du réservoir

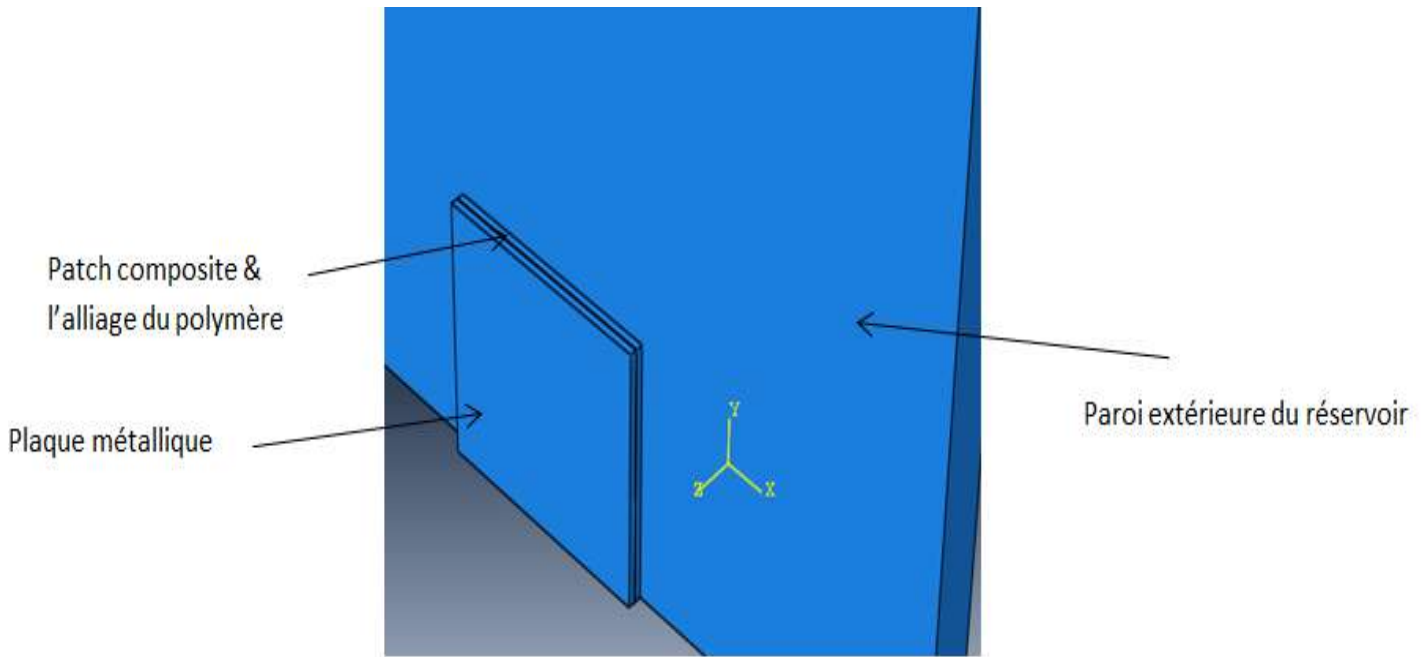


Figure III. 9: Réparation de la fissure par assemblage (soudage à froid)

### III.5.3. Conditions aux limites

Pour exécuter la simulation nous avons appliqué les conditions aux limites suivantes:

- 1- Appliquer une pression uniforme interne sur la surface interne
- 2- fixation les deux cotes du bac (coté bas et coté supérieur)

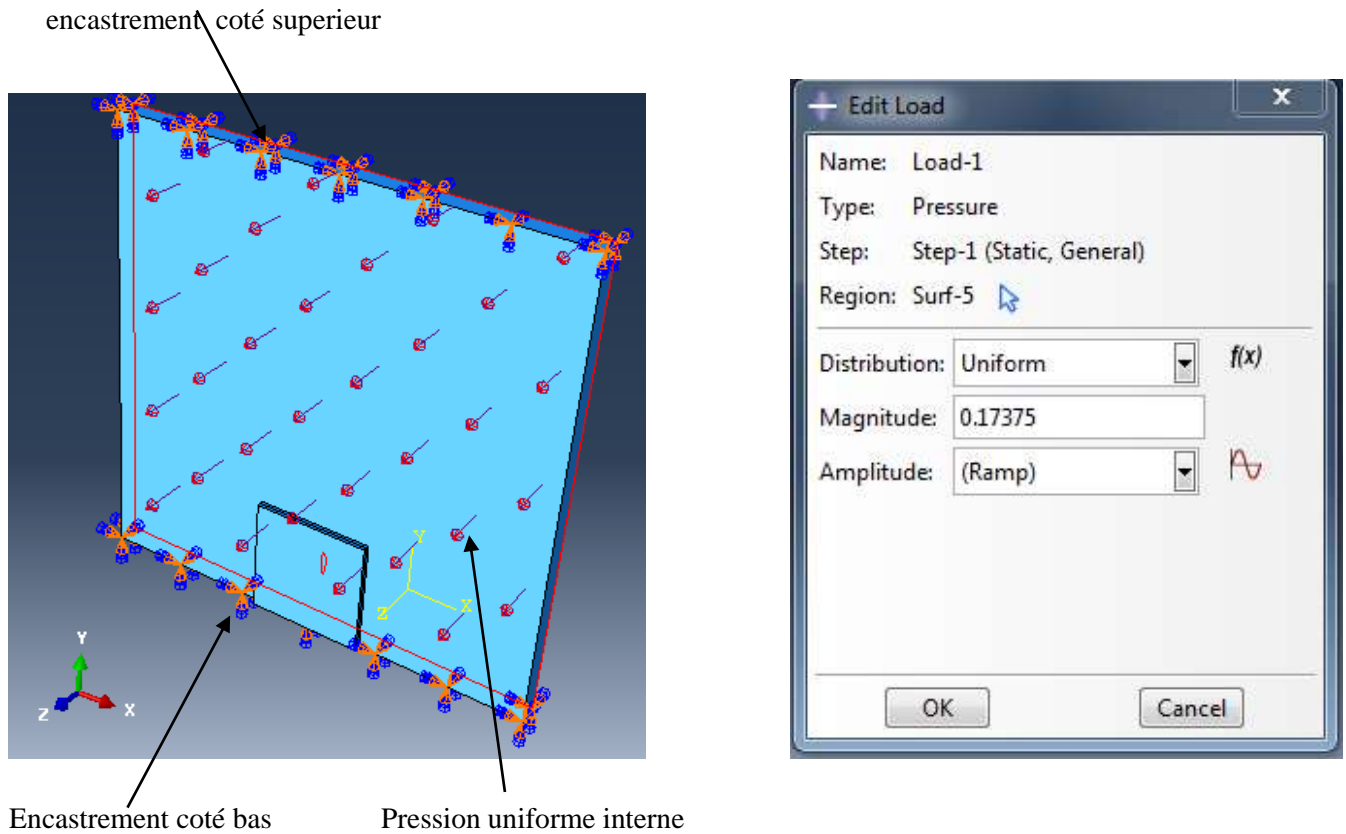


Figure III.10 : Représentation des conditions aux limites

### III.5.4. Maillage

L'objet du maillage est discrétiser géométriquement le domaine d'analyse de manière à pouvoir ultérieurement associer une formulation élément fini au support géométrique.

Concrètement cette discrétisation s'effectue par la création d'objet de type de maillage à l'aide des opérateurs géométriques.

Dans cette étude on a utilisé l'élément fini (Hex) pour construire les maillages.

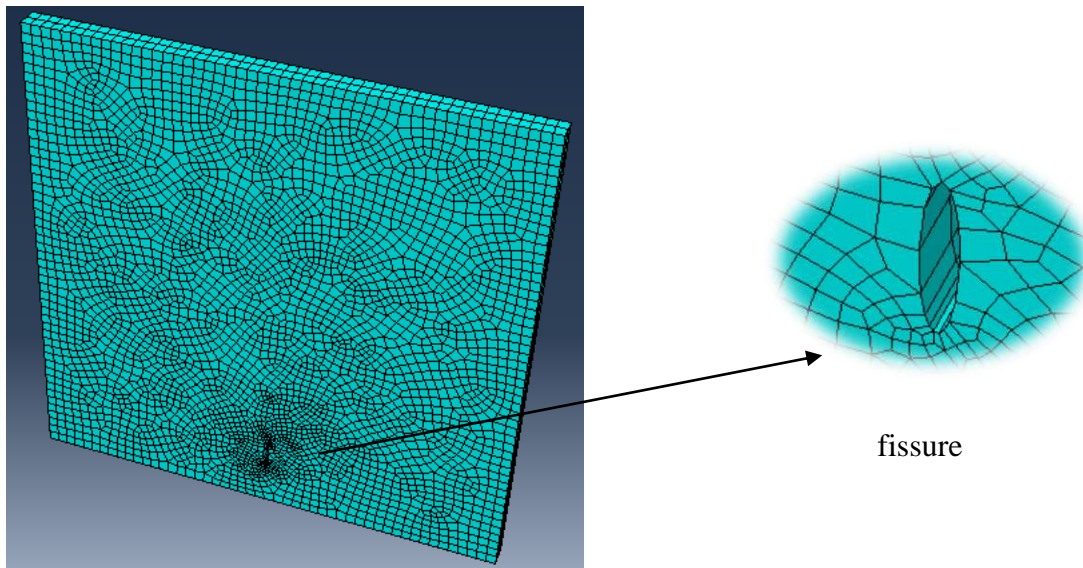


Figure III.11. : Maillage du Partie du réservoir avec la fissure

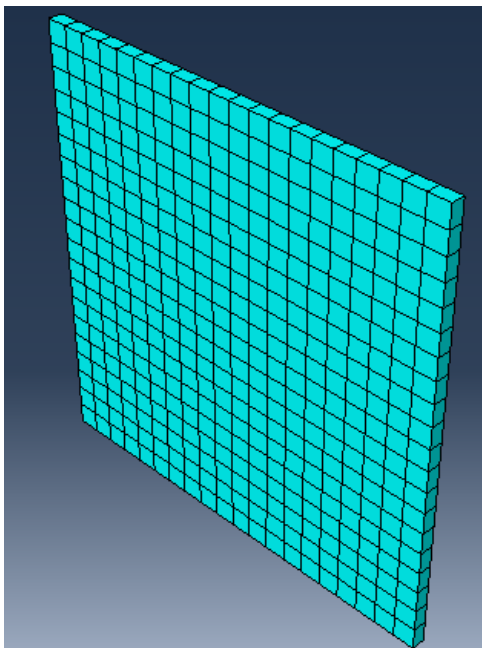


Figure III.12 : Maillage du patch

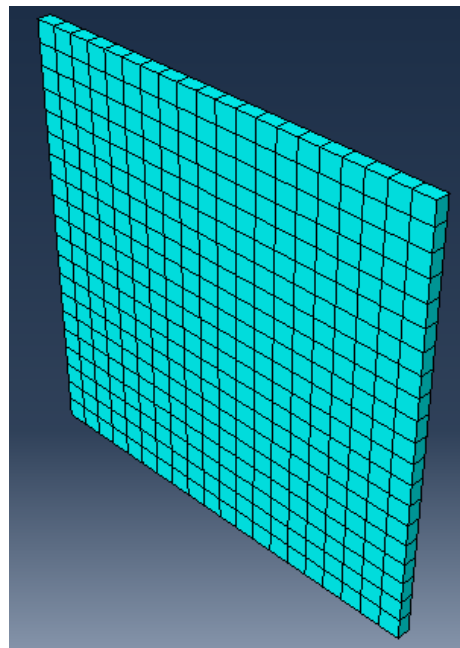


Figure III.13 : Maillage de la plaque

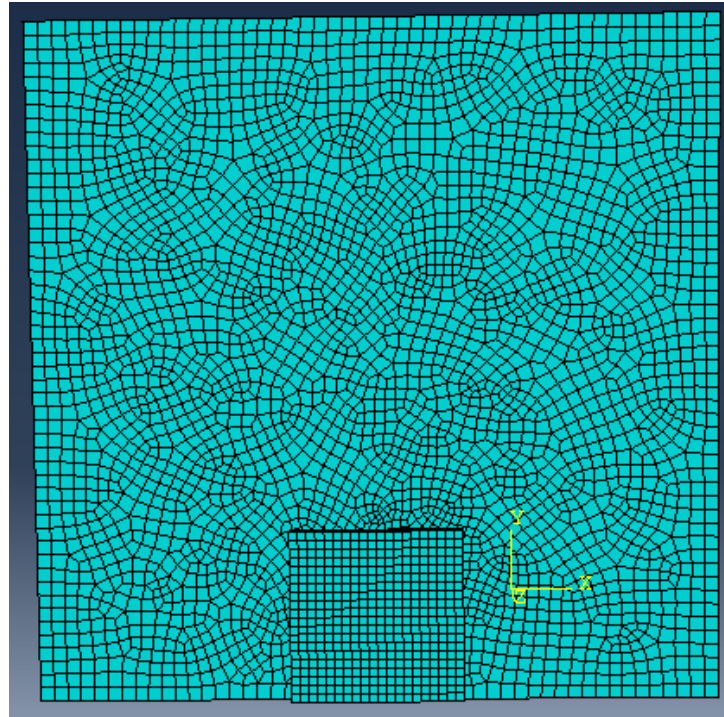


Figure III.14 : Maillage de l'assemblage

	Type de maillage	Nombre d'élément	Nombre totale d'élément
bac	hexaèdre	7060	7860
plaque		400	
patch		400	

### III.5.5. Résultats

Dans cette partie de l'étude et après l'analyse des données de calcul traité par le système de calcul (Abaqus /CAE™) les résultats de la simulation sont présentés sur les figures suivantes

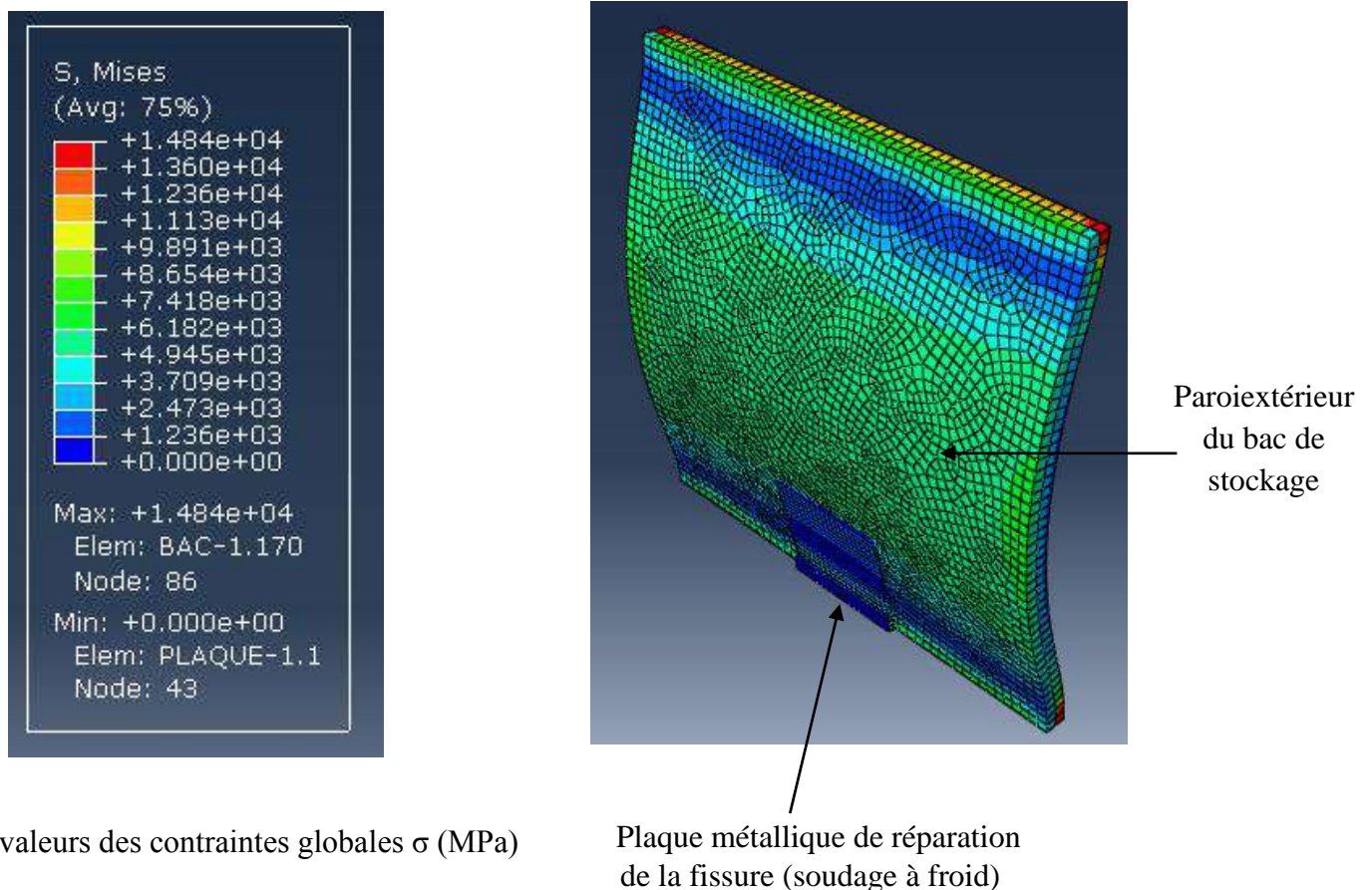
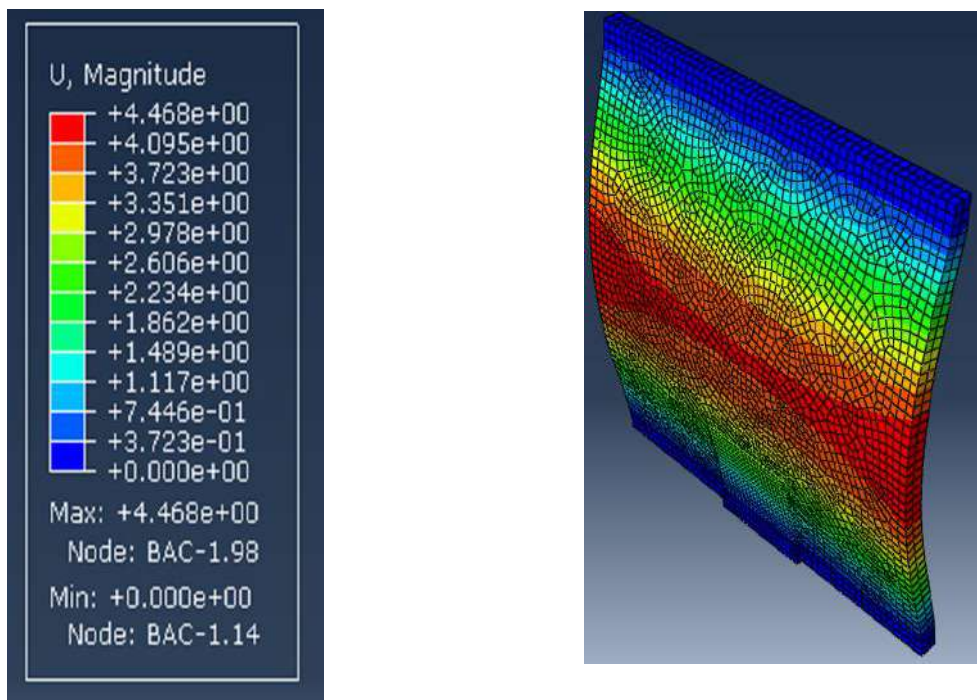


Figure III. 15 :Représentation du maillage par éléments finis du champ des contraintes de l'assemblage





Les valeurs des déplacements  $\Delta L$  (mm)

Figure III. 16: L'influence des déplacements ( $\Delta L$ ) sur la paroi extérieure et la plaque métallique suivant (x;y;z)

\*Représentation graphique global des contraintes et déplacements suivant (x ; y ; z) :

Tableau III. 3: Les valeurs des contraintes et les déplacements traités par abaqus suivant (x;y;z)

N°	Contrainte $\sigma$ [MPa]	Déplacement $\Delta L$ [mm]
01	$1.484 \times 10^4 = 14840$	4.468
02	$1.360 \times 10^4 = 13600$	4.095
03	$1.236 \times 10^4 = 12360$	3.723
04	$1.113 \times 10^4 = 11130$	3.351
05	$9.891 \times 10^3 = 9891$	2.978
06	$8.654 \times 10^3 = 8654$	2.606
07	$7.418 \times 10^3 = 7418$	2.234
08	$6.182 \times 10^3 = 6182$	1.862
09	$4.945 \times 10^3 = 4945$	1.489
10	$3.709 \times 10^3 = 3709$	1.117
11	$2.473 \times 10^3 = 2473$	$7.446 \times 10^{-01} = 0.7446$
12	$1.236 \times 10^3 = 1236$	$3.723 \times 10^{-01} = 0.3723$
13	0.0000	0.0000

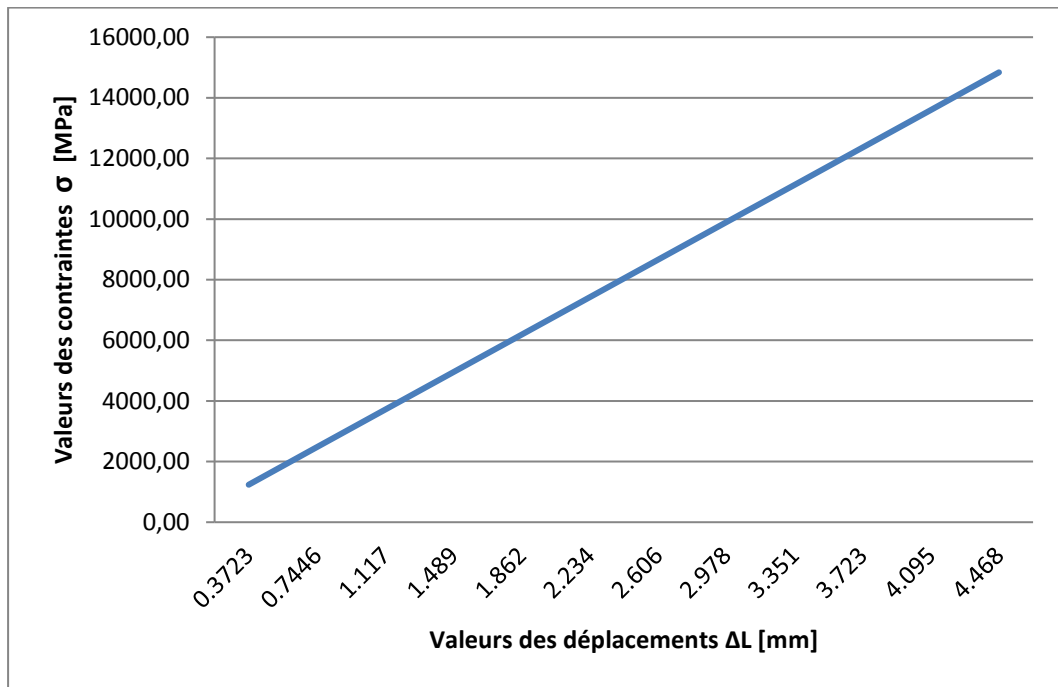


Figure III. 17: Représentation graphique des contraintes et les déplacements globaux appliqués sur la zone réparée

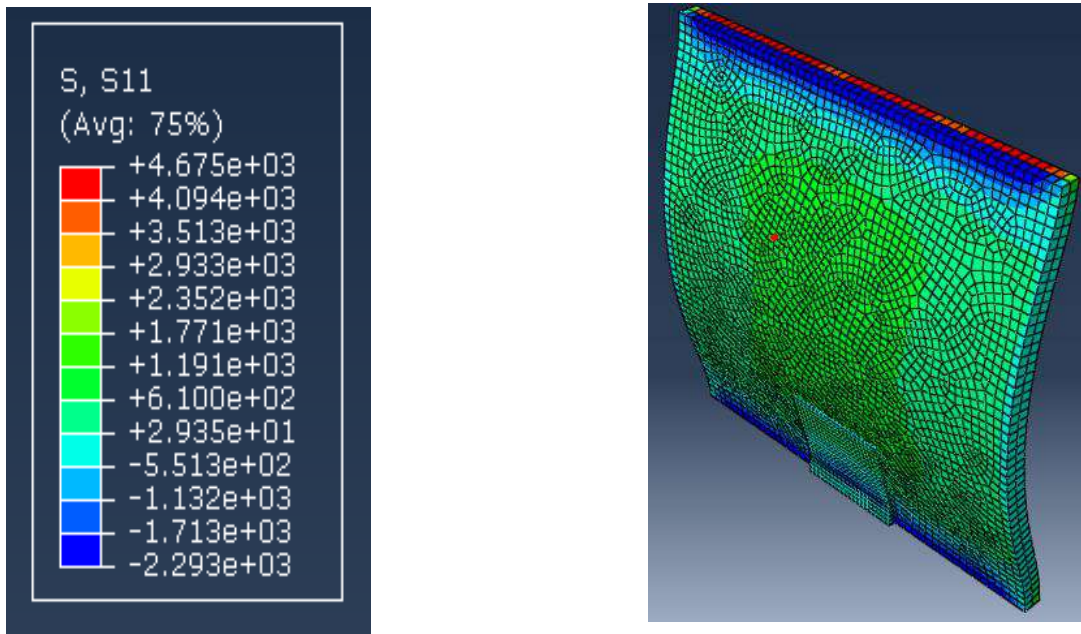


Figure III. 18 : La répartition des contraintes ( $\sigma_{xx}$ ) et leur influence suivant l'axe des abscisses

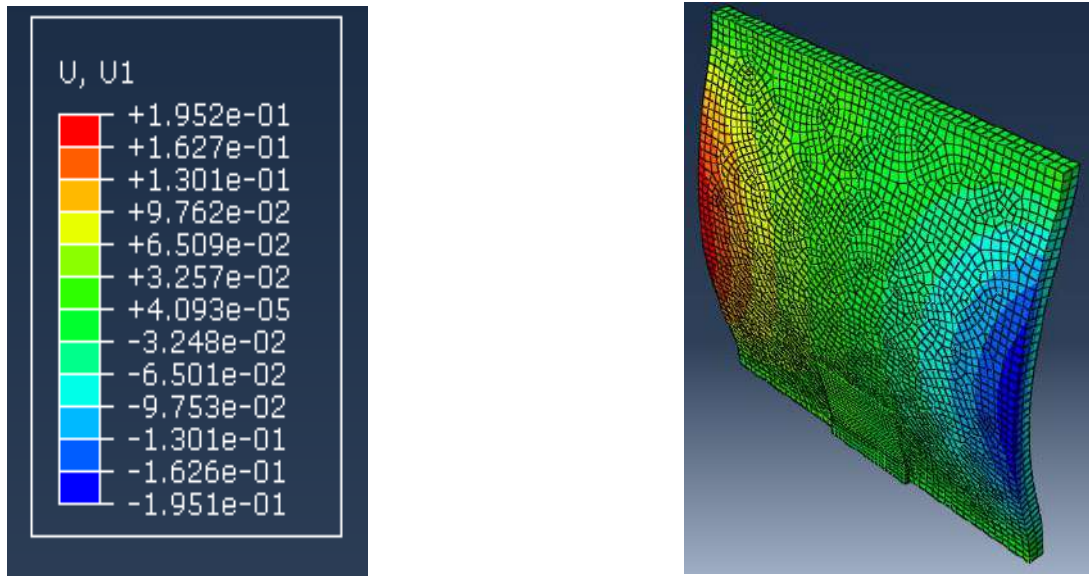


Figure III. 19 :L'influence des déplacements ( $\Delta L_x$ ) sur la paroi extérieure et la plaque métallique suivant l'axe des abscisses

\*Représentation graphique des contraintes ( $\sigma_{xx}$ ) et les déplacements ( $\Delta L_x$ ):

Tableau III. 4: Les valeurs des contraintes  $\sigma_{xx}$  et les déplacements  $\Delta L_x$  traités par Abaqus suivant l'axe d'abscisse (x).

N°	Contrainte $\sigma_{xx}$ [MPa]	Déplacement $\Delta L_x$ [mm]
01	$4.675 \times 10^3 = 4675$	$1.952 \times 10^{-01} = 0.1952$
02	$4.094 \times 10^3 = 4094$	$1.627 \times 10^{-01} = 0.1627$
03	$3.513 \times 10^3 = 3513$	$1.301 \times 10^{-01} = 0.1301$
04	$2.933 \times 10^3 = 2933$	$9.762 \times 10^{-02} = 0.09762$
05	$2.352 \times 10^3 = 2352$	$6.509 \times 10^{-02} = 0.06509$
06	$1.771 \times 10^3 = 1771$	$3.257 \times 10^{-02} = 0.03257$
07	$1.191 \times 10^3 = 1191$	$4.093 \times 10^{-05} = 0.00004093$
08	$6.100 \times 10^2 = 610$	$-3.248 \times 10^{-02} = -0.03248$
09	$2.935 \times 10^1 = 29.35$	$-6.501 \times 10^{-02} = -0.06501$
10	$-5.513 \times 10^2 = -551.3$	$-9.753 \times 10^{-02} = -0.09753$
11	$-1.132 \times 10^3 = -1132$	$-1.301 \times 10^{-01} = -0.1301$
12	$-1.713 \times 10^3 = -1713$	$-1.626 \times 10^{-01} = -0.1626$
13	$-2.293 \times 10^3 = -2293$	$-1.951 \times 10^{-01} = -0.1951$

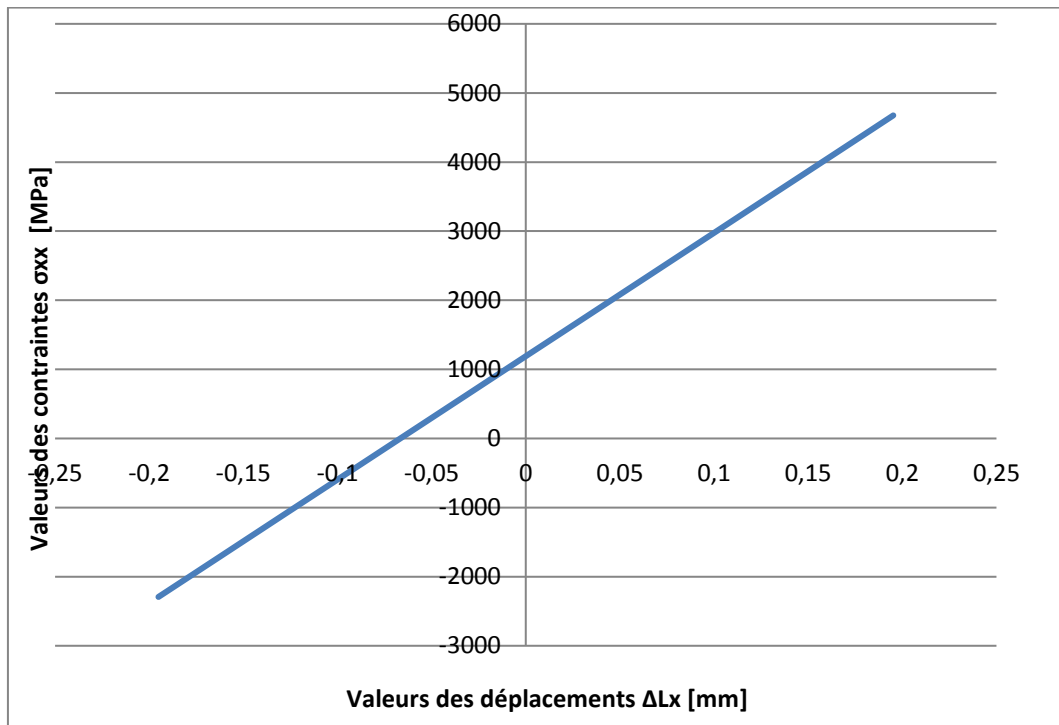


Figure III. 20: Représentation graphique des contraintes et les déplacements appliqués sur la zone réparée suivant l'axe d'abscisse

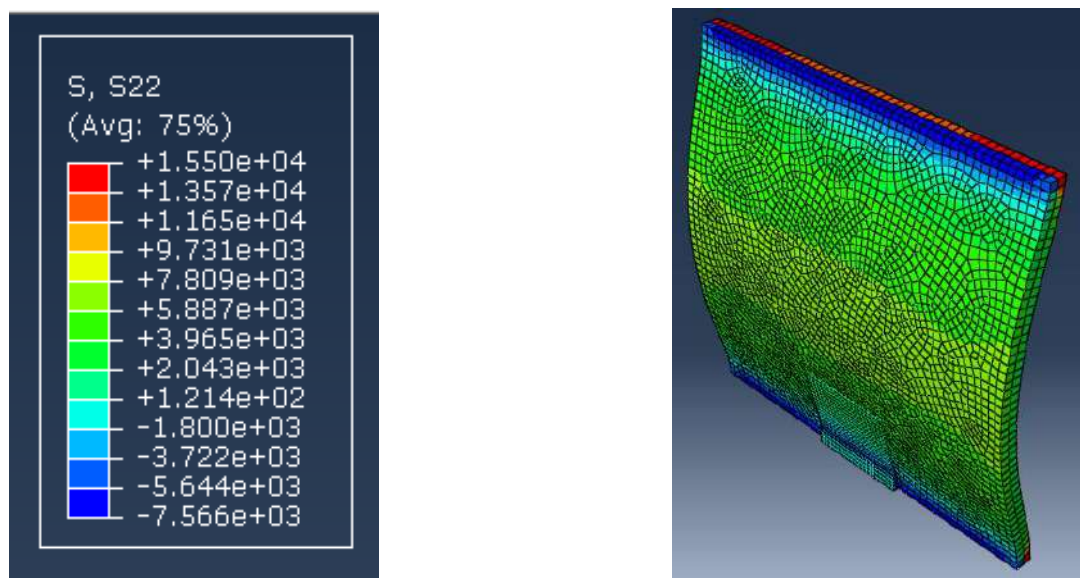


Figure III. 21 :La répartition des contraintes ( $\sigma_{yy}$ ) et leur influence suivant l'axe des ordonnées (y)

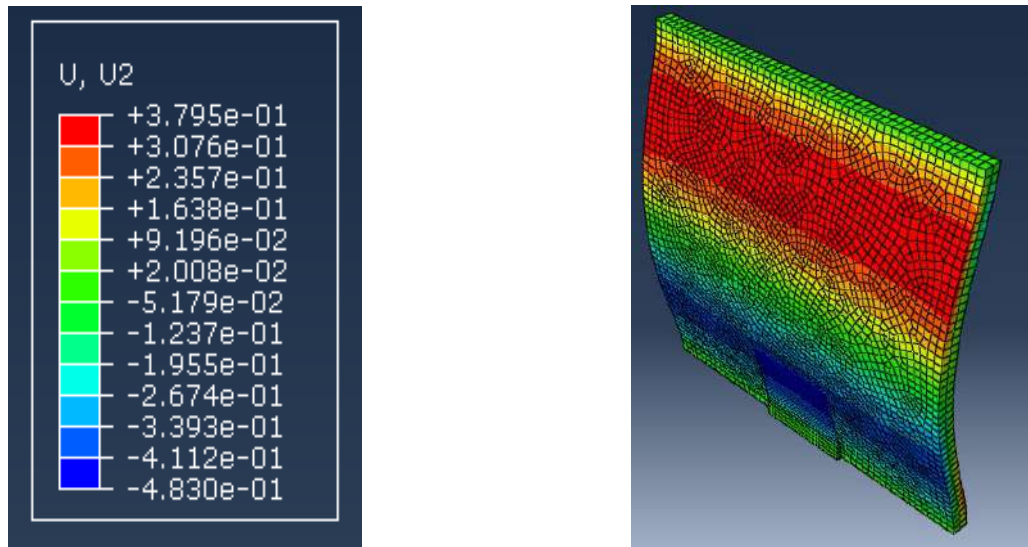


Figure III. 22: L'influence des déplacements ( $\Delta Ly$ ) sur la paroi extérieure et la plaque métallique suivant l'axe des ordonnées (y)

\*Représentation graphique des contraintes ( $\sigma_{yy}$ ) et les déplacements ( $\Delta Ly$ ):

Tableau III. 5: Les valeurs des contraintes  $\sigma_{yy}$  et les déplacements  $\Delta Ly$  traités par Abaqus suivant l'axe des ordonnées (y)

N°	Contrainte $\sigma_{yy}$ [MPa]	Déplacement $\Delta Ly$ [mm]
01	$1.550 \times 10^4 = 15550$	$3.795 \times 10^{-01} = 0.3795$
02	$1.357 \times 10^4 = 13570$	$3.076 \times 10^{-01} = 0.3076$
03	$1.165 \times 10^4 = 11650$	$2.357 \times 10^{-01} = 0.2357$
04	$9.731 \times 10^3 = 9731$	$1.638 \times 10^{-01} = 0.1638$
05	$7.809 \times 10^3 = 7809$	$9.196 \times 10^{-02} = 0.09196$
06	$5.887 \times 10^3 = 5887$	$2.008 \times 10^{-02} = 0.02008$
07	$3.965 \times 10^3 = 3965$	$-5.179 \times 10^{-02} = -0.05179$
08	$2.043 \times 10^3 = 2043$	$-1.237 \times 10^{-01} = -0.1237$
09	$1.214 \times 10^2 = 121.4$	$-1.955 \times 10^{-01} = -0.1955$
10	$-1.800 \times 10^3 = -1800$	$-2.674 \times 10^{-01} = -0.2674$
11	$-3.722 \times 10^3 = -3722$	$-3.393 \times 10^{-01} = -0.3393$
12	$-5.644 \times 10^3 = -5644$	$-4.112 \times 10^{-01} = -0.4112$
13	$-7.566 \times 10^3 = -7566$	$-4.830 \times 10^{-01} = -0.4830$

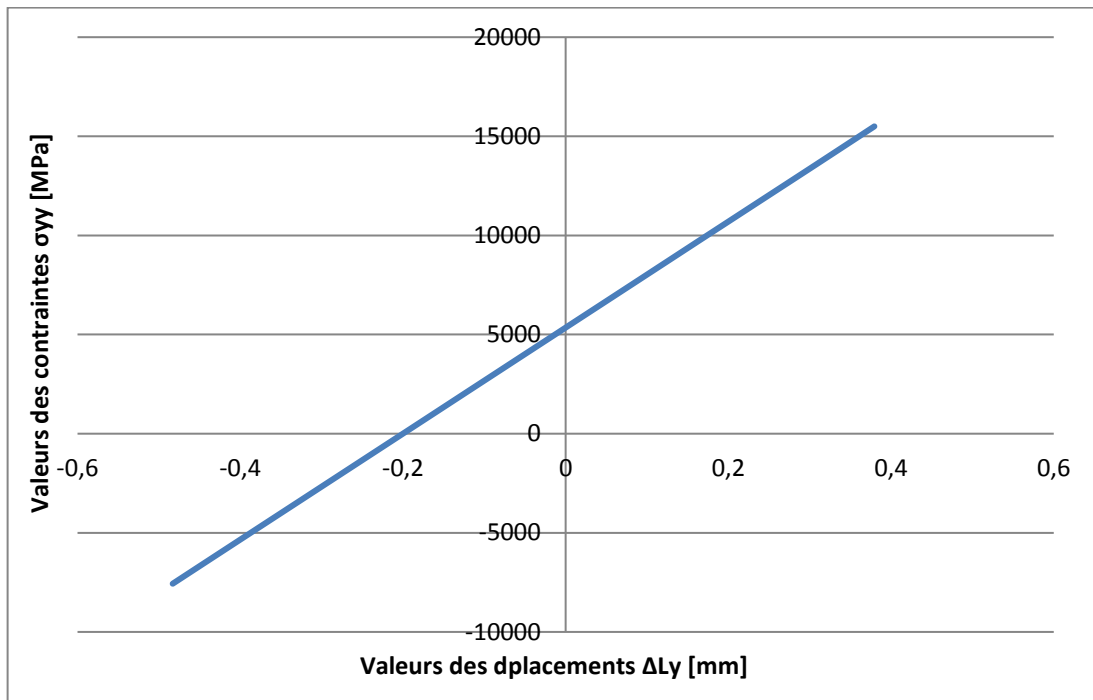


Figure III. 23: Représentation graphique des contraintes et les déplacements appliqués sur la zone réparée suivant l'axe des ordonnées

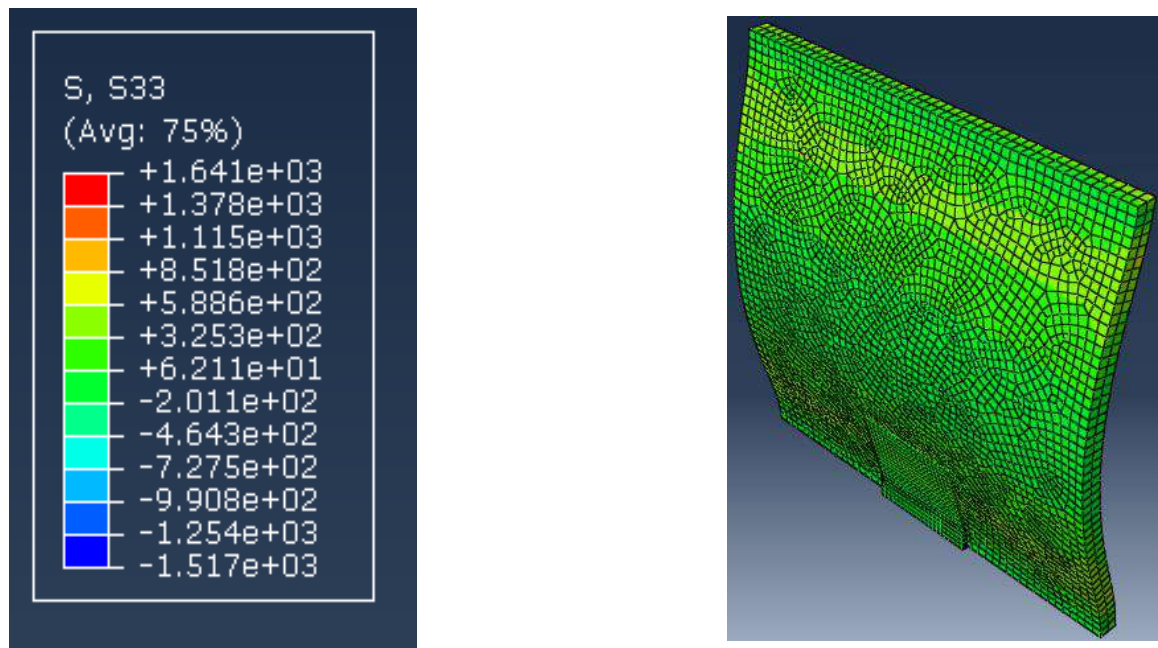


Figure III. 24: La répartition des contraintes ( $\sigma_{zz}$ ) et leur influence suivant l'axe des cotes (z)

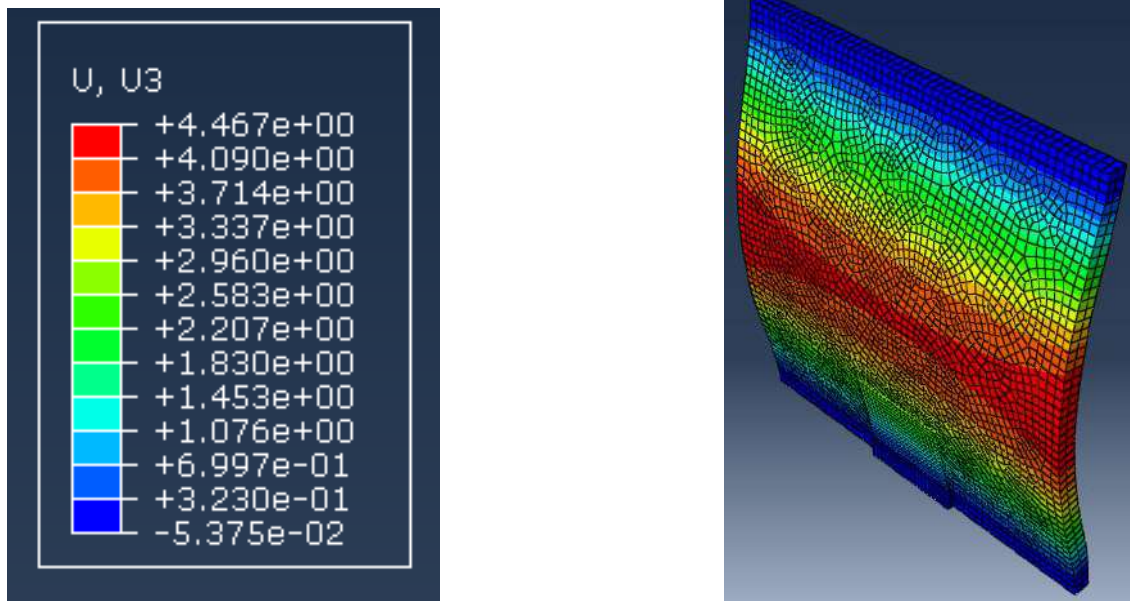


Figure III.25: L'influence des déplacements ( $\Delta Lz$ ) sur la paroi extérieure et la plaque métallique suivant l'axe des cotes ( $z$ )

Représentation graphique des contraintes ( $\sigma_{zz}$ ) et les déplacements ( $\Delta Lz$ ):

Tableau III. 6: Les valeurs des contraintes  $\sigma_{zz}$  et les déplacements  $\Delta Lz$  traités par Abaqus suivant l'axe des cotes ( $z$ )

N°	Contrainte $\sigma_{zz}$ [MPa]	Déplacement $\Delta Lz$ [mm]
01	$1.641 \times 10^3 = 1641$	4.467
02	$1.378 \times 10^3 = 1378$	4.090
03	$1.115 \times 10^3 = 1115$	3.714
04	$8.518 \times 10^2 = 851.1$	3.337
05	$5.886 \times 10^2 = 588.6$	2.960
06	$3.253 \times 10^2 = 325.3$	2.583
07	$6.211 \times 10^1 = 62.11$	2.207
08	$-2.011 \times 10^2 = -201.1$	1.830
09	$-4.643 \times 10^2 = -464.3$	1.453
10	$-7.275 \times 10^2 = -727.5$	1.076
11	$-9.908 \times 10^2 = -990.8$	$6.997 \times 10^{-1} = 0.6997$
12	$-1.254 \times 10^3 = -1254$	$3.230 \times 10^{-1} = 0.3230$
13	$-1.517 \times 10^3 = -1517$	$-5.375 \times 10^{-2} = -0.05375$

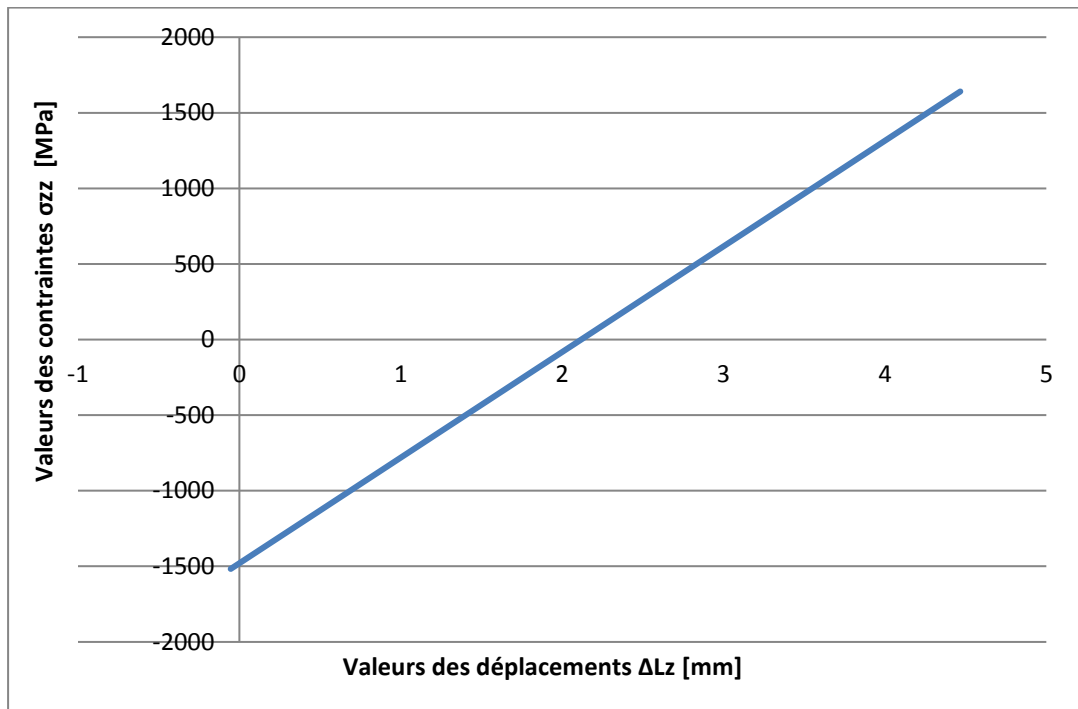


Figure III. 26: Représentation graphique des contraintes et les déplacements appliqués sur la zone réparée suivant l'axe des cotes

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les outils nécessaires pour déterminer et visualiser les champs des contraintes et les valeurs de déplacements obtenue du matériau de l'assemblage, (plaque métallique ; Patch composite) après la réparation de la fissure par la méthode de simulation en utilisant le code de calcul Abaqus/CAE™. On a étudié un cas pratique d'un réservoir de stockage pétrolier (région EL MERK) qui a subi une fissure, en utilisant les paramètres techniques du Patch composite et la plaque métallique de renforcement avec les caractéristiques technique du réservoir comme données de base. Toutes les informations utilisées pour réaliser la simulation et le traitement des résultats sont soulevés de la source (direction engineering SH). Les résultats des simulations sont la suivante :

Les valeurs des contraintes globales appliquées sur la plaque métallique de renforcement et le patch composite et compris entre [1236 – 3709] MPa sont inférieurs à la valeur maximale [14840] MPa ce qui va assurer la sécurité de l'assemblage et l'arrêt de la propagation des fissures (Figure III. 15) ;

Les résultats de l'interprétation des simulations pour chaque direction concernant les valeurs des contraintes et les déplacements [ $\sigma_{xx}$  ;  $\sigma_{yy}$  ;  $\sigma_{zz}$ ] et [ $\Delta L_x$  ;  $\Delta L_y$  ;  $\Delta L_z$ ] sont approximativement satisfaisants et acceptables ;

Selon les résultats de la simulation la zone de la fissure réparée et protégée de l'influence des contraintes maximales.



## *Conclusion Générale*

Nous avons commencé par un bref rappel sur un aperçu historique de la rupture avant la révolution industrielle et les concepteurs de cette époque qui ont laissé des édifices que l'on peut encore contempler (pyramide, pond....ext). Le phénomène de la rupture n'est pas nouvelle mais les recherches sont commencer Just au début du 19<sup>ème</sup> siècle, avec l'utilisation de l'acier pour pouvoir enfin concevoir des structures capables de résister à des charges de traction et compression.

Dans un premier temps, ces risques de rupture ont été réduits en surdimensionnés les structures. Mais cette solution devint insatisfaisante compte tenu des nécessités d'une part d'alléger de plus en plus les structures, et d'autre part de réduire les coûts. La recherche en mécanique de la rupture devait donc être développée.

L'étude présentée à des préoccupations liées à la maintenance dans le secteur de l'industrie pétrolière, en s'intéressant sur les nouvelles méthodes de réparations et sur l'augmentation de la durée de vie de structures et les équipements endommagés.

Les deux approches utilisées pour comprendre le phénomène de la rupture et de réaliser des conceptions et le dimensionnement des structures sont les suivants :

La première approche, la plus classique, repose sur la limite d'élasticité du matériau  $\sigma E$ .

La deuxième approche s'appuie sur le concept de ténacité  $KC$  issu de la mécanique linéaire de la rupture (MLR).

L'explication scientifique du mode de la rupture c'est la séparation locale d'un solide en deux parties forment les trois modes de rupture. On appelle le déplacement des deux plans d'un solide en deux parties ou glissement des surfaces sous l'influence des contraintes ( $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ ) par le terme technique fissurations suivant le sens des plans (x,y,z).

On a appliqué sur site la réparation des fissures apparaissent sur les Pipe-lines et les réservoirs de stockage à grande capacité en utilisant un patch composite et des alliages à base de polymère pour permettre le collage des plaques métalliques à froid sur les surfaces qui ont subi des fissures et attaqué par la corrosion.

L'utilisation de soudage à froid par le collage des plaques métallique va nous permettre d'éliminer complètement le risque dramatique du soudage classique (acétylène & oxygène).

L'expérience pratique réalisée au niveau de la région pétrolière ourhood , nous a montré que le contrôle de la propagation des fissures et la protection des surfaces extérieures contre la corrosion doivent être réalisés avant la dégradation totale des structures pour éviter l'arrêt brutal de l'opération de production.

La rénovation des surfaces intérieures des pompes centrifuges par l'époxy de polymère nous a permis d'améliorer l'efficacité de la performance de 3% à 8% pour les pompes neuves, et de 20 % pour les pompes déjà en service.

Les performances des réparations par les composites à base de polymère permettent désormais aux industries d'obtenir une réparation normalisée, qui est adaptée et permanente.

L'intégration de la simulation par élément fini en utilisant le logiciel de calcul Abaqus/CAE a donné des solutions praticables pour des problèmes très variés en mécanique de rupture avant la conception des structures et l'utilisation et après utilisation tel que :

Définir la disposition et les valeurs des contraintes maximales et minimales ;

Définir l'emplacement des déformations et le déplacement des plans de cisaillements ;

Etudier la progression des fissures et leur propagation pour qu'on puisse trouver des solutions rapides de maintenance avant la dégradation totale de la zone critique.

Planification de construire des structures pour les nouveaux projets et prendre en considération toutes les conséquences en entrant les données de calcul et les paramètres qui caractérisent chaque organe tel que :

Pression [MPa] ;

Dimension [m] ;

Densité du Matériau ( $d$ ) ;

Module de Young ( $E$ ) [MPa] ;

Contrainte ( $\sigma$ ) [MPa] ;

Nuance du matériau ;

Coefficient de Poisson ( $\nu$ ) ;

Déformation ( $\xi$ ) [mm].

Dans le cas de notre étude on a réussi d'aboutir une solution pour stopper la propagation d'une fissure positionnée au niveau du bas d'un réservoir de stockage pétrolier 51200 m<sup>3</sup> par la méthode de soudage à froid, et les résultats de la simulation confirment que l'opération de maintenance est efficace et fonctionne en toute sécurité

## *Références Bibliographique*

- [1] Mr.Abderrahim ZEGLOUL Cours Concepts Fondamentaux de la mécanique de la rupture UNIVRSITE DE LORRAINE (2016-2017)
- [2] Mr Ahmed BENHAMOUDA : "Etude Du Comportement Des Fissures dans Les Tubes Sous Pression Interne" ,Magistere: UNIVERCITE MANTOURI CONSTANTINE 2010.
- [3] Tahar Nateche: "Réhabilitation et Renforcement des Canalisations sous pression en présence des défauts de surfaces", thèse de Doctorat: Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf (Oran) 2011.
- [4] Sébastien GRANGE Cours La mécanique de la rupture et la mesure de la ténacité ECOLE NORMALE SUPERIEURE PARIS 2007
- [5] Jacques Renard, Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère (JUILLET 2005).
- [6] J-Y. Buffier, S. Savelli, Materials Science and Engineering (2001).
- [7] P. Raabe, H.P, A. Garlier, Essai de fatigue-Partie I, Technique de l'ingénieur (10/03/2000)
- [8] Mokhtari Morgane, Propriétés mécanique des matériaux composite (INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES) (LYON) 2020.
- [9] Analyse des structures mécanique par la méthode des éléments fini, Département Mécanique, Ecole Polytechnique (2009-2010).
- [10] Direction engineering Haoud el Hamr (SH) hassi messaoud 2020.
- [11] Solution polymères BELZONA pour les machines et les équipements 2012.
- [12] Bouzahzah Merouane, : "Etude de l'endommagement surfacique d'une poutre sandwich (Carbone / Céramique) sous sollicitations mécaniques, Master: UNIVERSITE «Abbès LAGHROUR» DE KHENCHELA 2016
- [13] Cours Mécanique de la rupture 2011 (<https://campus.mines-douai.fr>)
- [14] Cours Endommagement et rupture des matériaux 2005.
- [15] BAHRI SKANDER : " Optimisation les caractéristiques d'un matériau (ACIER X52) par simulation numérique", Master: UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA (2015/2016)

## *Résumé*

La sécurité de l'opération de production des hydrocarbures (pétrole ; gas) à travers les équipements de production tel que les bacs de stockage, pipeline, pompe centrifuge et devenue une exigence obligatoire pour éviter les accidents provoqué par les facteurs suivant : Pression ; Corrosion ; Fatigue ; Rupture ; Fissure.

L'intégration des composites a base du polymère dans le domaine de maintenance par les chercheurs à changer complètement la vision des utilisateurs qui ont bénéficié du taux très élevé du facteur de sécurité et le réduit de l'impact environnemental avec des gains importants du temps de réalisation des projets en évitant le temps d'arrêt.

Dans le cadre de cette thèse on a étudié l'impact et la valeur ajoutée qui a ramené l'utilisation de l'alliage de polymère pour réparer les fissures et les endommagements apparaissent sur les surfaces des bacs de stockage pétroliers, Pipe-line et les pompes centrifuges sous l'influence de la corrosion, érosion, attaque chimique et différente pressions.

Une expérience pratique réalisée au niveau de la zone industrielle ourhood à donner des solutions remarquables et efficaces après l'utilisation un Patch composite pour la réparation des percements et des fissures sur les grandes lignes des Pipe-line.

Le remplacement définitif de la soudure à chaud (oxygène & acétylène) par le soudage à froid en appliquant le collage des plaques métallique sur les lieux endommagées a l'intermédiaire des alliages de polymères appropriés pour assurer la protection contre la corrosion et arrêter la propagation des fissures.

L'objectif final de cette étude est d'augmenter la durée de vie et le facteur de sécurité des structures pétrolières en assurant la continuité des opérations de production.

Un système de calcul (Abaqus/CAE™ ) a pour but d'analyser la géométrie et le comportement des défauts et le calcul des contraintes qui vont être supporter par les structures après l'opération de maintenance.

## ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو إيجاد حلول تطبيقية تمكننا من إجراء عمليات الصيانة و إصلاح الأعطاب في مضخات الطرد المركزي (Pompe centrifuge) و إصلاح التشققات التي تظهر على الهياكل المعدنية خاصة في حاويات التخزين (Bac de stockage pétrolier) المثبتة على الخرسانة و أنابيب نقل مواد البترولية. (Pipe –line)

الغرض من هذه الدراسة هو استعمال اللواصق المركبة و القطع المعدنية المضادة للأكسدة في عمليات التلحيم على البارد بدون استعمال الحرارة و المواد الغازية (Oxygène etAcétyléne) سريعة الانفجار .

مع العلم بان استعمال اللواصق المركبة يرفع من مؤشر الأمان أثناء وبعد عملية الصيانة دون الأضرار بالتركيب البلورية (structure cristalline) للهيكال المعدني ودون الأضرار بعمليات الإنتاج و النقل.

كما أظهرت النتائج المتحصل عليها على وجود انخفاض معتبر لمعامل شدة الإجهاد و سرعة انتشار التشققات و التصدعات على المستوى الطولي و العرضي .

إن استعمال القطع المعدنية المضادة للأكسدة و اللواصق المركبة يساهم بشكل ايجابي في زيادة عمر استغلال المنشأة بنسبة تقدر ب 70 بالمئة من العمر المتاح في شهادة ضمان الاستغلال المرخص من المصنع .

كما يقلص بشكل جذري من تكلفة التغيير الكلي للقطع الميكانيكية المتضررة من الأكسدة و التشققات.

## *Abstract*

The final objective of this study is to increase the life duration and factor's safety of the structures and production's oil equipments. During operation's maintenance of cracks and surfaces defects we using two methods : Composit Patch & Cold welding.

The safety of oil'sproduction operation through the equipment such as storage etanks, Piplines, centrifugal pumps has become obligatory requirement to avoid accidents caused by the following factors :

Pressure ; Corrosion ; Tiredness ; Breaking ; Craks

The integration of the polymer's composites in the maintenance field has completely change the researchers's vision and users who have benefited from the very high safety factor and reduced the environmental's impact with considerable gains in project's completion time by avoiding down-time.

As part of this research, we studied the impact and added value that brought back the use of the polymer alloy to repair cracks and damage appear on the surfaces of oil storage tanks, pipelines and centrifugal pumps under the influence of corrosion, erosion, chemical attack and different pressures.

A practical experience realized industrial'soil area in ourhood has led to remarkable and effective solutions after using a composite patch to repair holes and cracks in pipelines.

Definitve replacement of heat welding by cold welding, we apply bonding'smetal plates on the damaged site by using appropriate polymer ralloys to provide the protection against corrosion and stop crack propagation.