

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : TECHNOLOGIE
Filière : GENIE MECANIQUE
Spécialité : ENERGETIQUE
Thème :

**Evaluation de la réparation
Par composite d'une pipe soumise à un chargement de pression**

Présenté Par :

- 1) BELKHAMGANI MOHAMED AMINE
- 2) BENDEHNOUN KHALIL

Devant les jurys composés de :

Pr. NEHARI	DRISS	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Président
Pr. OUDAD	WAHID	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Encadrant
Dr. BELHAMIANI	MOHAMED	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Examineur

Année universitaire 2018/2019

Table des matières

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

I.	Chapitre I :	1
I.1	Procédés de fabrication des pipelines :	2
I.1.1	Les tubes soudés sous forme spirale :	3
I.1.1.1	Croquage et formage :	4
I.1.1.2	Soudage :	5
I.2	Propriétés et caractéristiques des pipelines :	7
I.2.1	Caractéristiques des tubes :	8
I.2.2	Propriétés et Caractéristiques mécaniques des aciers (normes API 5L) :	9
I.2.3	Composition chimique de l'acier :	10
I.3	Principales causes de défaillances des pipelines :	11
I.3.1	Fissuration des pipelines :	12
I.3.1.1	Définition :	12
I.3.1.2	Les types de fissures :	13
I.3.2	Les défaillances par déformation plastique :	14
I.3.3	Défaillances par rupture fragile :	14
I.3.4	Défaillances par rupture ductile :	15
I.3.5	Corrosion des pipelines :	16
I.3.5.1	Définition :	16
I.3.5.2	Les types de corrosion :	17
I.3.6	Erosion :	19
I.3.6.1	Théorie de l'érosion :	19
I.3.6.2	Mécanisme de l'érosion par des particules solides :	19
I.3.7	Enfoncements :	21
I.3.8	Les éraflures :	21
I.3.9	Les défauts combinés (enfoncements et éraflures) :	22
II.	Chapitre II :	24

II.1	Techniques de détection des défauts dans les pipelines :.....	25
II.1.1	Détection visuel :.....	26
II.1.2	Détection par radiographie :.....	26
II.1.3	Détection par ultrasons :.....	26
II.1.4	Détection par outil intelligent :.....	27
II.2	Méthodes de réparation des pipelines :.....	27
II.2.1	Réparation des pipelines par patch en composite :.....	28
II.2.1.1	Réparation par collage :.....	28
II.2.1.2	Système de réparation par renforcement des fibres composites :.....	29
II.2.2	Autres méthodes de réparation des pipelines :.....	31
III.	<i>Chapitre III</i>	36
	Introduction :	37
III.1	Présentation du logiciel ABAQUS/CAE :.....	37
III.2	Le module Part :	38
III.3	Le module Property :.....	39
III.4	Le module Assembly :.....	39
III.5	Le module Step :.....	40
III.6	Le module Interaction :.....	41
III.7	Le module Load :	42
III.8	Le module Mesh :.....	42
III.9	Module Job :.....	43
III.10	Module Visualisation :.....	43
III.11	Modèle géométrique :	43
III.12	Résultats et interprétations :	44
III.12.1	Effet de la géométrie de la fissure :	44
III.12.1.1	Effet de l'angle d'ouverture de la fissure :.....	44
III.13	Effet de l'épaisseur de la colle :.....	50
	Conclusion :	51
	Références bibliographiques	53

Résumé

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des biens, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir des tubes d'aciers soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol. Ces pipelines s'avèrent être soumis à des endommagements causés par un manque de matière ou de fissure faisant ainsi appelle à des méthodes de réparation ou de renforcement. Notre étude qui s'inscrit dans ce domaine consiste à modéliser une fissure circonférentielle dans un pipeline en acier **API 5L X65** réparé par patch. La simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis tridimensionnels à l'aide du code de calcul ABAQUS 6.14 est utilisé pour analyser l'effet de l'avancement de la fissure, la géométrie de la fissure ainsi que l'effet de l'épaisseur et de la longueur du patch sur le facteur d'intensité de contraintes en mode I.

Mots clés : Pipeline, fissure circonférentielle, acier **API 5L X65**, patch, facteur d'intensité de contraintes.

Abstract

A pipeline is a buried or aerial canalisation that carries goods, whether liquid or gas. Pipelines are most often constructed from butt welded steel pipes, coated externally or even internally and usually buried in the ground. These pipelines are found to be subject to damage caused by a lack of material or crack, thus calling for repair or reinforcement methods. Our study in this field consists of modeling a circumferential crack in a patch-repaired **API 5L X65** steel pipeline. The numerical simulation based on the three-dimensional finite element method using the ABAQUS calculation code 6.14 is used to analyze the effect of crack advancement, crack geometry and the effect of thickness and the length of the patch on the I-mode stress intensity factor.

Keywords: Pipeline, circumferential crack, **API 5L X65** steel, patch, stress intensity factor

Liste des figures

Figure I.1 : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale	3
Figure I.2 : L'angle d'introduction de la bande	4
Figure I.3 : Croquage	4
Figure I.4 : Formage sous forme "U"	5
Figure I.5 : Formage sous forme "O"	5
Figure I.6 : Soudage manuelle et automatique des tubes	6
Figure I.7 : Fabrication de pipe en soudure « Schéma du filage sur aiguille permettant d'obtenir un tube sans soudure	7
Figure I.8 : Pipeline dans l'environnement	7
Figure I.9 : Caractéristique des tubes	9
Figure I.10 : Fissuration par corrosion	12
Figure I.11 : Mode de rupture d'une canalisation dans le cas d'une fissuration longitudinale	13
Figure I.12 : Géométrie d'un tube avec une fissure circonférentielle	14
Figure I.13: Modes de ruptures	15
Figure I.14 : corrosion interne dans le pipe	16
Figure I.15 : Corrosion externe dans une pipe	16
Figure I.16 : Corrosion par piqûration	17
Figure I.17 : Corrosion bactérienne	18
Figure I.18: Mécanisme d'érosion par des particules.....	19
Figure I.19 : Géométrie d'un enfoncement et photo d'un pipeline enfoncé	20
Figure I.20: engins provoquant une éraflures et géométrie d'une éraflure	21
Figure I.21 : Géométrie d'un défaut combiné	21
Figure I.22 : photo d'une éraflure dans un enfoncement	22
Figure II.1 : outil intelligent d'inspection	26
Figure II.2 : Réparation par composites d'une pipe en acier.....	28
Figure II.3 : Emballage de composite flexible pour la réparation sous –	29
Figure II.4 : réparation par renforcement composite type clockspring	30
Figure II.5 : Méthode de meulage, (a) défaut de fissure, (b) réparation par meulage, (c) structure après réparation	30
Figure II.6 : perçage au fond de la fissure	31
Figure II.7 : Dimensions géométrique de la fissure et trou de réparation	32
Figure II-8 : Géométrie de demi-coquilles	32
Figure II.9 : (a) réparation de surface pour réfection enrobage, fuite de bentalha (Oran, Algérie), réfection enrobage	33
Figure II.10 : changement du tronçon endommagé d'une canalisation, (a) découpe, (b) ré-soudage	34
Figure III.1 : Etapes à suivre pour la programmation	37
Figure III.2 : géométrie de pipe	37
Figure III.3 : propriété du pipeline	39
Figure III.4 : Assemblage des structures	39
Figure III.5: déclaration des interactions.....	40
Figure III.6 : déclaration des conditions aux limites	41
Figure III.7 : Maillage du modèle géométrique	42
Figure III.8 : Modèle géométrique	43
Figure III.9: variation du facteur d'intensité de contrainte K_I (FIC) en fonction de l'angle d'ouverture de la fissure pour une pipe non réparée ($a=20\%$).....	44

Figure III.10 : variation du facteur d'intensité de contrainte K_I (FIC) en fonction de l'angle d'ouverture de la fissure pour une pipe réparée ($a=20\%$).....	44
Figure III.11 : variation de l'efficacité de la réparation X^* en fonction de l'angle α° ($a=20\%$).....	45
Figure III.12 : variation du facteur d'intensité de contrainte K_I (FIC) en fonction de l'angle d'ouverture de la fissure pour une pipe non réparée ($a=30\%$).....	45
Figure III.13 : variation du facteur d'intensité de contrainte K_I (FIC) en fonction de l'angle d'ouverture de la fissure pour une pipe réparée ($a=30\%$).....	46
Figure III.14 : variation de l'efficacité de la réparation X^* en fonction de l'angle α° ($a=30\text{mm}$).....	46
Figure III.15: variation de l'efficacité de la réparation X^* en fonction de l'angle α	47
Figure III.16 : variation de l'efficacité en fonction des profondeurs de la fissure.....	48
Figure III.17 : variation de l'efficacité X^*_{ext} en fonction des profondeurs (a) et seulement pour $\alpha=20^\circ$ et 90°	48
Figure III.18 : variation du FIC K_I en fonction de l'épaisseur de la colle ($a=50\%$, $\alpha=30^\circ$).....	59
Figure III.19 : Répartition des contraintes dans le composite en fonction de l'orientation des fibres	51

Liste des tableaux

Tableau I.1 : propriétés mécaniques des aciers pour tubes selon la norme API.	10
Tableau III.1 : Propriétés mécaniques des différents matériaux	38

Liste des abréviations

API : American Petroleum Institute

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

MLR : Mécanique Linéaire de Rupture

CC : Cubique Centré

CFC : Cubique à Face Centrée

CIM : Corrosion Induite Microbiologiquement

M.E.F : Méthode Eléments Finis

Introduction générale :

Les pipelines sont depuis des décennies le moyen d'acheminement le moins coûteux et le plus sûr pour de grandes quantités et sur de longues distances de fluide notamment le pétrole, le gaz. Etant enterrés sous terre ou en mer, ils sont le plus souvent exposés à des risques d'endommagement causés par des agressions internes et externes à savoir la corrosion, les enfoncements, les fissures, les éraflures, l'érosion...etc. Ce qui peut altérer leurs performances voir entraîner de graves conséquences environnementales s'ils ne sont pas assez tôt détectés. Ainsi donc après détection de ces défaillances, ces canalisations requièrent des méthodes de renforcement ou de réparation en vue de leur redonner leurs performances initiales. Le but de ce mémoire est de modéliser une fissure circumférentielle dans un pipeline API 5L X60 réparé par patch composite et montrer l'efficacité de la réparation à travers différentes configurations en utilisant l'outil de simulation numérique (ABAQUS 6.14). Ce mémoire comprendra trois chapitres à savoir :
} Le premier chapitre consacré à une généralité sur les pipelines.
} Le second chapitre abordera les techniques de détection et méthodes de réparations des défauts dans les pipelines
} Enfin le troisième chapitre sera consacré à la simulation numérique.

I. Chapitre I :

GENERALITES SUR LES PIPELINES

Introduction :

Selon le petit Larousse un pipeline est une canalisation pour le transport à distance de liquide, notamment du pétrole (oléoduc) ou de gaz (gazoduc). Les pipelines tiennent une place importante dans les industries gazières et pétrolières, et contribuent pleinement à leur développement durable en assurant leur fonction de production de transport et de distribution. En effet, le transport des hydrocarbures par pipeline reste le moyen le plus sécurisant pour acheminer de grandes quantités de pétroles et de gaz sur de longues distances. Ces conduites de transport constituent des constructions coûteuses, dues à la quantité et à la qualité de l'acier des tubes. Généralement enterrés, quelquefois, inaccessibles à l'examen, se faisant même parfois oublier, les gazoducs et oléoducs baignent dans des milieux particulièrement agressif, du fait de leurs hétérogénéités et du grand nombre d'impuretés qu'ils contiennent ce qui entraîne des défaillances dans ces conduites. Ce chapitre portera sur:

- Les procédés de fabrication des pipelines.
- Les propriétés et caractéristiques des pipelines.
- Les principales causes de défaillances dans les pipelines.

I.1 Procédés de fabrication des pipelines :

Pour la fabrication des tubes, un grand nombre de matériau peut être utilisé : fonte, plastiques, résines armées, etc...La plupart des pipelines sont faits d'aciers, bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les pipelines d'aciers sont fabriqués en soudant de courtes sections de tuyaux (20 m) les uns aux autres, recouverts d'un matériau isolant (polyéthylène, polypropylène,..) contribuant à leur protection contre la corrosion. Ils peuvent être revêtus intérieurement voire extérieurement pour améliorer l'écoulement du fluide transporté ou pour prévenir une quelconque corrosion. On retrouve :

- Les tubes soudés sous la forme en spirale.
- Les tubes soudés sous forme longitudinale.
- Les tubes formés sans soudure [1]

I.1.1 Les tubes soudés sous forme spirale :

Les tubes soudés en spirale sont obtenues par enroulement et soudure hélicoïdale d'un ruban de tôle approvisionné sous forme de bobines. Ce procédé exige un contrôle très sévère de la soudure en usine, en raison des nombreuses reprises qu'il entraîne, et impose un appareillage très étudié et une très bonne qualité des tôles, pour garantir une bonne fiabilité de la fabrication. Les précautions nécessaires étant prises, ce procédé est appelé à se développer en raison des économies de transport qu'il occasionne et de la simplicité relative des usines de fabrication. Il permet d'ailleurs d'atteindre de très gros diamètres, très largement supérieurs aux diamètres obtenus industriellement par soudure longitudinale puisque l'on peut fabriquer à partir de ce procédé jusqu'à des diamètres de 100"(2540 mm) avec une épaisseur de 1"(25.4 mm) [1].

Les tubes soudés en spirale sont faits par cintrage de bande de feuille d'acier de la forme d'un tuyau et la soudure ensemble, cette technique de production passe par des étapes, comme l'indique la figure(I.1). Le soudage se produit ici sur la production de tubes en spirale qui sont généralement fournis.

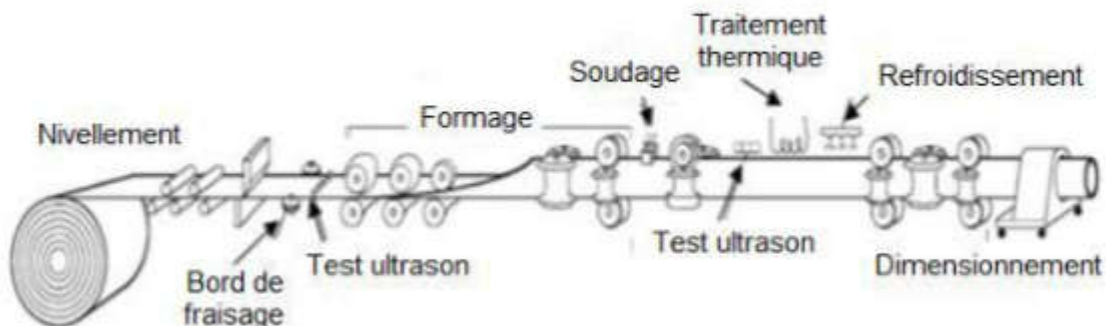


Figure I.1 : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale

Le formage du tube en spirale se fait avec inclinaison de la bande qui se Calcule par la relation suivante (figure I.2):

$$\beta = \arcsin (/ Dext \pi) \quad (1)$$

Avec B : la largeur de bande

Dext : le diamètre extérieur de tube formé

β : L'angle d'introduction de la bande par rapport à l'axe symétrique () Pratiquement, c'est très difficile de fabriquer les tubes avec un petit angle aigu, c'est pour cela que les valeurs de l'angle se limitent entre 15° et 50°.

I.1-2 Les tubes soudés sous forme longitudinal :

La technique de fabrication des tubes soudés sous forme longitudinal suit le processus "UOE" . Cette technique est spécifique aux tubes avec des diamètres plus que (406.4 mm), et passe par trois étapes de formage :



Figure I.2 : l'angle d'introduction de la bande [2]

I.1.1.1 Croquage et formage :

c'est l'étape où la plaque va être pliée au niveau des extrémités . L'objectif de cette opération est de faciliter le processus de pliage par les étapes suivantes : la tôle (ou) la plaque unitaire est pliée à partir de deux types de presse, la première confère à la plaque une forme "U" et la seconde lui donne une forme "O" (voir les figures I.(3,4 et 5)) .

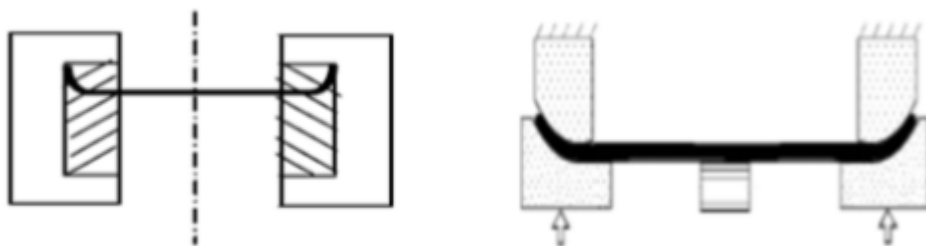


Figure I.3 : Croquage [3]

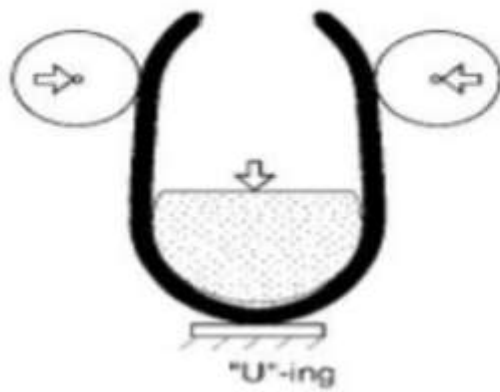


Figure I.4 : Formage sous forme "U"

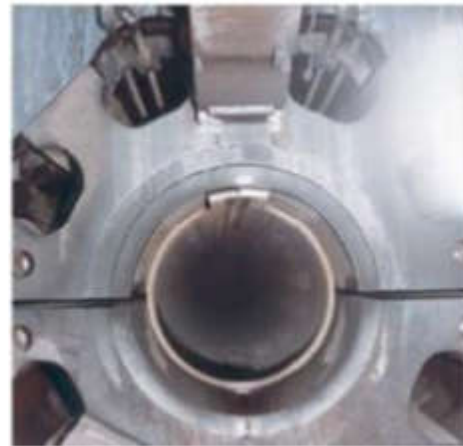
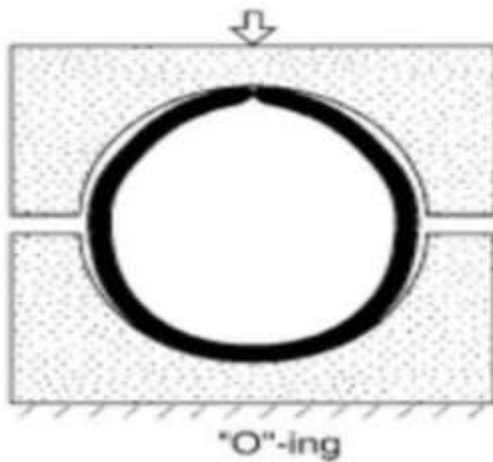


Figure I.5 : formage sous forme « O »

I.1.1.2 Soudage :

Le soudage ici est celui de la technique de soudage à l'arc sous flux à l'aide de tête soudeuse automatique, les soudures intérieures et extérieures grandissent longitudinalement sur une trajectoire d'une ligne droite, généralement le cordon intérieur est réalisé le premier, figure(1.6)



Figure I.6 : Soudage manuelle et automatique des tubes [1]

I.1-2-C Expansion et calibrage

L'objectif de cette opération est d'atteindre des tubes de section parfaitement circulaire, l'augmentation est de 1.5 m au maximum

I.1-3 Les tubes sans soudure

La technique utilisée pour la fabrication des tubes non soudés est le laminage. Le laminage est un procédé de déformation plastique continue, obtenue par les cylindres de laminoir. Cette déformation est caractérisée par un amincissement et un allongement (la pièce laminée ne s'élargie presque pas). Le laminage en passes successives peut produire une forte réduction d'épaisseur. Le laminage modifie la structure cristalline primaire du lingot, affine le grain, homogénéise la composition et améliore les caractéristiques, surtout dans le sens longitudinal, en raison de l'orientation donnée aux structures cristallines.[1]

On distingue deux types de laminage à savoir le laminage à chaud et à froid.

Dans le laminage à chaud, la température du matériau est choisie de façon à obtenir les caractéristiques plastiques optimales. Le laminage à froid se fait à la température ambiante et nécessite une abondante lubrification. L'importance de la variation de section à chaque passe est limitée.[1]

Le principe de fabrication des tubes non soudés est le suivant, sans soudure : une barre pleine en acier de section circulaire (billet) est petit à petit laminée à chaud au diamètre extérieur requis, et percée à chaud par repoussage du métal jusqu'à obtention de l'épaisseur et de la longueur de tube requises

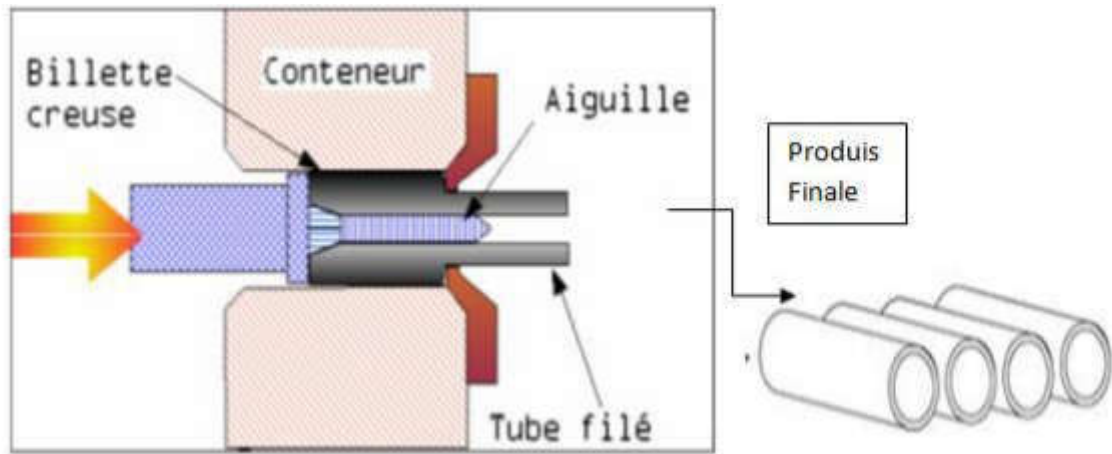


Figure I.7 : Fabrication de pipe en soudure un schéma de filage sur aiguille permettant d'obtenir un tube son soudure [4]

I.2 Propriétés et caractéristiques des pipelines :

On désigne par « pipelines », les oléoducs ou gazoducs qui sont des canalisations de diamètres pouvant aller de 1 à 42 pouces (1pouce = 2.54 centimètre). Celles-ci sont le plus souvent en acier, constituées d'éléments linéaires soudés bout en bout et revêtus, dans lesquelles transitent, sous des pressions relativement élevées, des produits pétroliers, liquides ou gazeux. Ces produits pétroliers sont propulsés par des installations de pompage ou de compression. Elles servent à transporter un produit entre deux points donnés et elles sont construites avec des matériaux et des techniques qui apportent la solution la plus économique au problème posé. [5] .



Figure I.8 : Pipeline dans l'environnement [5]

I.2.1 Caractéristiques des tubes :

Le type et le nom d'une canalisation dépendent des caractéristiques physiques et des conditions d'acheminement du produit à déplacer.[4]

- Pour le gaz naturel, on parle de gazoduc
- Pour le pétrole, on parle d'oléoduc
- Pour l'eau industrielle, il s'agit de conduite ou d'émissaire. Le terme d'aqueduc est plutôt réservé aux ouvrages maçonnés avec écoulement libre de l'eau
- Pour l'eau salée, on utilise le terme de saumoduc
- Pour l'oxygène on utilise le terme d'oxygènoduc ou d'oxyduc
- Pour l'hydrogène on utilise le terme d'hydrogènoduc

De manière générale, le suffixe d'origine latine "ductus", dérivé de "ducere" qui veut dire "conduire", permet ainsi de construire le nom français d'une canalisation spécialisée pour l'acheminement d'un type de produit particulier.

Les gazoducs de moyenne pression sont généralement en polyéthylène haute densité (PEHD), et les canalisations d'eau, jadis maçonnées ou en fonte (métallurgie) grise à graphite lamellaire, sont aujourd'hui en fonte (métallurgie) grise à graphite sphéroïdal (également appelé fonte ductile), en polychlorure de vinyle, en polyéthylène haute densité (PEHD), mais également en béton armé ou en acier.[4]

Ceci dit, Les caractéristiques principales des pipelines (diamètres, épaisseur, type d'acier, spécifications de construction, températures et pression d'exploitation...) sont régies par tout un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et de compromis économiques. (Figure I.9), ainsi donc les caractéristiques d'une canalisation sont déterminés en fonction du débit des produits à acheminer, de leur viscosité, de leur densité et des conditions d'exploitations de façon à réaliser un compromis économique entre la puissance des stations de pompage ou de compression à installer et l'importance de l'investissement total à réaliser.[6]

Lorsque les considérations technico-économiques ont ainsi permis de fixer le diamètre, et d'ailleurs également la pression de service, on calcule l'épaisseur en fonction de cette pression de service ou des conditions de pose lesquelles parfois imposent des caractéristiques dimensionnelles plus sévères.

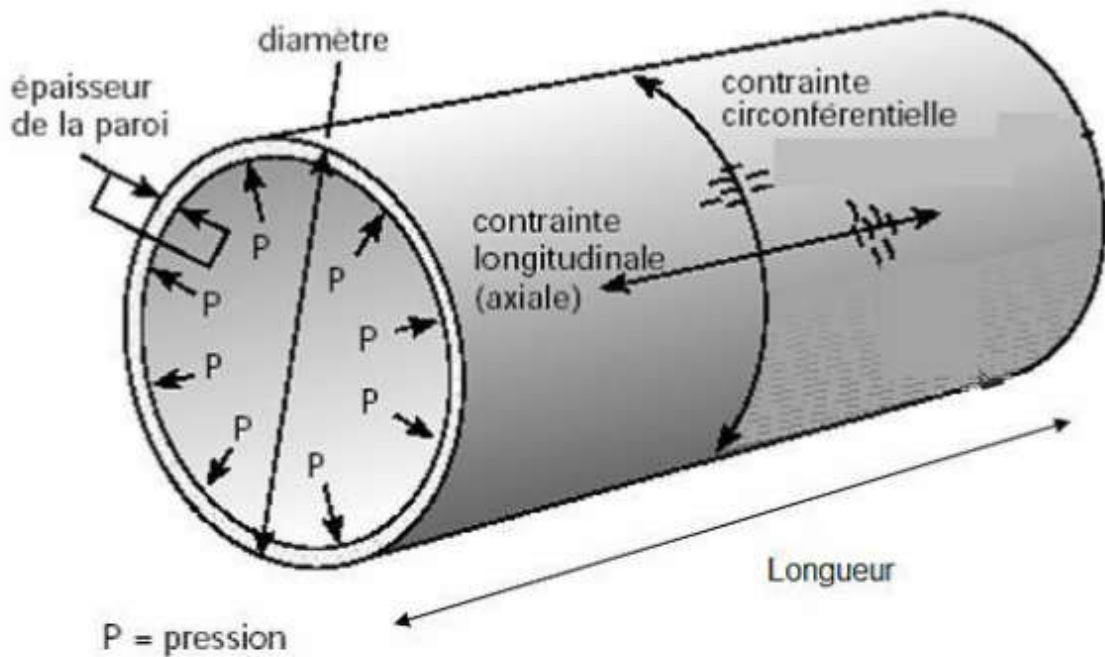


Figure I.9 : Caractéristique des tubes

I.2.2 Propriétés et Caractéristiques mécaniques des aciers (normes API 5L) :

Le développement des transports à grande distance de quantités importantes d'hydrocarbures a nécessité l'emploi des tubes de grand diamètre, exploités à des pressions plus élevées. Pour éviter d'atteindre des épaisseurs difficiles à souder et faire des économies d'aciers, des nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques sont améliorées. C'est ainsi qu'on a vu apparaître les grades X60, X65, X70, X80 et même X100. [4]

L'acier est un alliage essentiellement composé de fer, sa densité varie donc autour de celle du fer (7.32 à 7.86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques. La densité d'un acier inox austénitique est typiquement un peu supérieure à 8, en raison de la structure cristalline. Ils ont un module de Yong d'environ 210000 MPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis. Le traitement thermomécanique est l'association :

- D'un traitement thermique sous la forme d'un cycle chauffage refroidissement (trempé, revenu...)
- D'un traitement mécanique, une déformation provoquant de l'érouissage (laminage, forgeage, tréfilage).

Les aciers de transport des hydrocarbures sont des aciers faiblement alliés qui doivent présenter des propriétés à l'amorçage de rupture d'une part et vis-à-vis de la propagation de l'arrêt des fissures lors de rupture fragile par clivage. D'autres parts, ils présentent également

une limite d'élasticité élevée due à la recherche d'une rentabilité accrue et une bonne soudabilité. Par conséquent concilier une haute limite d'élasticité et une bonne ténacité est exigé pour la fiabilité des aciers. [4]

Les qualités d'aciers couramment utilisés dans la construction des pipelines sont définies dans deux spécifications API qui sont adoptées depuis 1992 par l'industrie pétrolière américaine dénommée :

- 5L pour les qualités normales
- 5LX pour les qualités à hautes résistances

Les qualités d'aciers les plus employés ont les propriétés mécaniques présentes dans le tableau suivant :

Spécification API	Grade	Limite d'élasticité (Kg/mm ²)	Résistance à la rupture (kg/mm ²)
5L	A	21	34
5L	B	25	42
5LX	X42	29	42
5LX	X46	32	45
5LX	X52	37	47
5LX	X56	39	52
5LX	X60	41	55
5LX	X65	46	56
5LX	X70	48	56

Tableau I.1 : Propriété mécanique des aciers pour tubes selon les normes [7]

I.2.3 Composition chimique de l'acier :

L'acier liquide est naturellement effervescent (présence de gaz sous forme d'oxydes). Lors de la coulée, l'oxygène s'allie avec le carbone du métal pour former du CO qui cherche à s'échapper pendant la solidification. Si la tête du lingot se refroidit trop vite, il se produit, à la partie supérieure, une zone riche en porosités.[8]

Pour éviter ces problèmes, la plupart des aciers sont coulés calmés. On ajoute à la charge des désoxydants dont l'action est plus forte que le carbone (ferro - manganèse, ferro -silicium, etc...) et l'aluminium en poche. (L'acier, en fait, est un corps métallique très complexe incorporant en solution divers éléments essentiels (C, Mn, Si,...) ou ajoutés (Cr, Ni, Nb, V, Mo, Cu, Al, Ti, B...) et des impuretés de l'élaboration (P, S, H₂, N₂...).[8]

Les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes : aciers au carbone faiblement alliés et aciers à faible teneur en carbone. Dans le premier groupe on trouve les aciers X42 à X52 (selon API) renfermant jusqu'à 0.3% C, 1.6% Mn, 0.7% Si. Dans le deuxième groupe on trouve les aciers faiblement alliés à basse teneur en

carbone X56, X50, X65, X70 renfermant 0.12% C, 0.45% Si, 0.25% S, 1.9% Mn, 0.1% Nb, 0.015% Al.[8]

L.3 Principales causes de défaillances des pipelines :

Dans l'industrie l'endommagement des pipelines et des réservoirs est bien constaté. Il est due aux conditions de service et aux paramètres d'environnement. Les structures conçues pour les produits, sont affectées par plusieurs types d'endommagement : érosion, corrosion, fragilisation...Ceux-ci se constate par: les fissures, les entailles, les trous, les défaut de géométrie complexe,...etc.

Tous les aciers pour pipelines peuvent connaître des défaillances à cause des forces externes ou internes, comme les contraintes mécaniques et thermiques, ou à cause de phénomènes connexe comme le fluage, la fatigue et l'érosion. Les tubes sont aussi susceptibles d'être attaqués par un phénomène de corrosion interne et externe, de fissuration ou bien de faille de fabrication. La corrosion interne et externe est la cause principale de fuites et de ruptures de canalisations, se traduisant parfois par des dégâts catastrophiques (dégâts humains, pollution du milieu naturel, frais supplémentaire de réparation, arrêt prolongé du pompage, etc.). Si un pipeline porteur d'eau est affecté d'un éclatement de fuite, au moins cela ne nuit pas à l'environnement. Cependant, si la fuite provient d'un pipeline affecté de pétrole ou de gaz, cela peut être un désastre environnemental.[4](La plupart de ces défaillances sont causées par des piqures de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contraintes, mais il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage. Les mouvements de terrains (glissements du sol, tremblement de terre...) peuvent aussi être la cause de dommage sur tubes enterrés.[9]

Nous venons de voir que les causes principales de défaillances dans les canalisations sont de diverses natures et elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite « fissure ».

D'autres causes, externes, correspondant à l'impact d'autres activités, constituent l'origine prédominante des accidents. Le scénario est à chaque fois sensiblement le même : des travaux totalement indépendants de la canalisation, le plus souvent enterrée (deux cas sur trois) sont engagés et les engins (de terrassement, agricoles ou autres) endommagent et souvent perforent la canalisation. Cette situation se rencontre dans près d'un accident sur deux. Il a été observé plusieurs cas où la canalisation, initialement enterrée à une profondeur significative (0,8 m à 1,0 m) lors de sa pose, se retrouve au fil des ans, du fait de l'érosion des terrains par exemple, à des profondeurs bien inférieures (jusqu'à 0,30 m), hauteur insuffisante pour éviter les impacts de socs de charrue par exemple.[4]

Les problèmes d'amorçage des fissures en fatigue et les ruptures émanant de concentrations de contraintes sont à l'origine de plus de 90% des ruptures en service. La présence d'une discontinuité géométrique telle qu'une entaille va provoquer l'affaiblissement de la résistance à la rupture du tube. Puisqu'elle va réduire la section de ce dernier en le rendant plus sensible à la pression de service et aux efforts causés par les mouvements des sols, ensuite un effet d'amplification locale de la contraintes va accroître la dangerosité de ce défaut.[4]

On distingue généralement pour les canalisations les défauts suivants : les fissures, les défaillances par déformation plastique, les défaillances par rupture fragile, les défaillances par rupture ductile, la corrosion, l'érosion, les enfoncements, les éraflures, et les défauts dits combinés (enfoncement + éraflures).

I.3.1 Fissuration des pipelines :

I.3.1.1 Définition :

La fissure est un défaut ou une discontinuité brutale apparue ou apparaissant dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, où la matière est séparée sur une certaine surface. Tant que les forces de contraintes ne sont pas libérés, elle entraîne une grande concentration de contrainte à son fond. Sa propagation, sous l'effet de contraintes suffisantes, combinée ou non avec un environnement agressif (corrosion sous contrainte) mène à la rupture.[9]

La figure suivante présente une fissuration par corrosion sous contrainte.

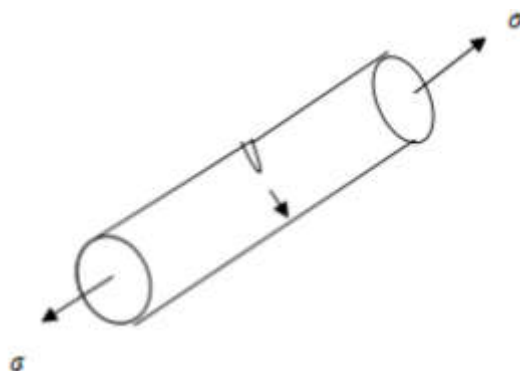


Figure I.10 : Fissuration par corrosion

I.3.1.2 Les types de fissures :

Il y'a différentes échelles de taille de fissure. Suresh et Ritchie (1984 ; 1991) [10] proposent les définitions suivantes pour les fissures courtes.

- **Fissures micro structurellement courtes**

La taille de la fissure est comparable à la taille caractéristique de la microstructure, comme la taille de grain pour les matériaux monolithiques.

- **Fissures mécaniquement courtes**

La taille de la zone plastique est comparable à la taille de la fissure.

- **Fissures physiquement courtes**

La taille de la fissure est supérieur à la taille des grains et à la taille de la zone plastique mais ne dépasse pas un millimètre.

- **Fissures chimiquement courtes**

Le comportement de la fissure peut être défini par une analyse basée sur la mécanique linéaire de rupture (MLR) mais elle présente certaines anomalies liées à la dépendance des effets de fatigue/ corrosion à la taille de la fissure.

En plus des fissures courtes, on distingue également les fissures longitudinales et circonférentielles.

- **Fissures longitudinales**

La fissuration longitudinale est un mode de rupture qui touche les conduites de grand diamètres et fragiles. C'est le cas par exemple de canalisations de distribution d'eau en fonte grise. La fissure se propage dans le sens longitudinal, et la pression interne peut provoquer la rupture complète de la canalisation. Ces causes sont souvent causées par des augmentations subites et inhabituelles de pression et des coups de béliers.[11]



Figure I.11 : Mode de rupture d'une canalisation dans les cas d'une fissuration longitudinale

- Fissures circonférentielles

Outre des fissures longitudinales on peut rencontrer dans les canalisations, aussi des fissures circonférentielles (voir figure I.15) Ces dernières peuvent se propager sur toute

l'épaisseur de la canalisation et sous les différentes sollicitations, conduisant à des ruptures brutales.[14]

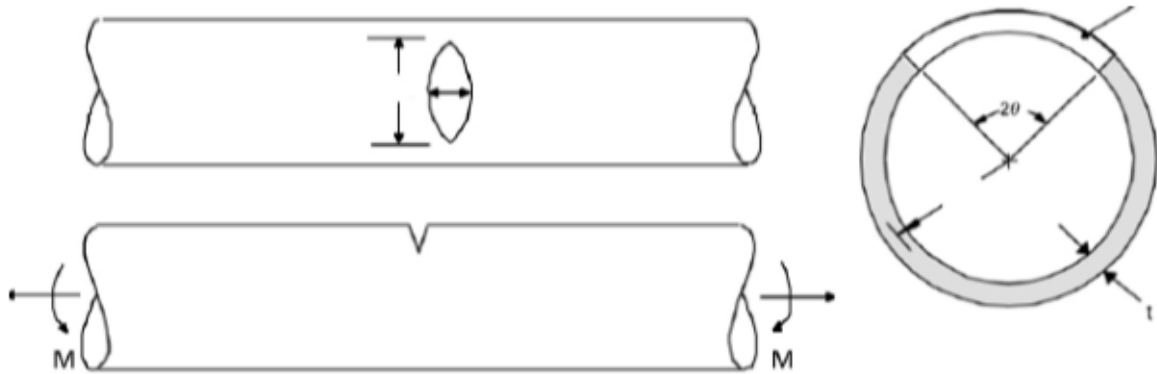


Figure I.12 : Géométrie d'un tube avec fissure circumférentielle

I.3.2 Les défaillances par déformation plastique :

Tout solide auquel est appliqué un effort mécanique se déforme. Différents essais de laboratoire (traction, compression, torsion...) permettent d'étudier les modes de déformation des matériaux d'un point de vue macroscopique et de déterminer leurs lois de comportement. Lors de tels essais, tant que le matériau est soumis à une contrainte inférieure à une valeur spécifique (appelé limite d'élasticité), il va se comporter de manière réversible. Si l'on effectue une décharge (annulation de la contrainte appliquée), le matériau recouvre sa forme initiale. A l'inverse, si l'on contraint le matériau au-delà de sa limite d'élasticité, une déformation persiste après la décharge : c'est la déformation plastique (figure I.16). La déformation plastique est donc essentiellement irréversible. En général, elle est isochore : le volume de l'objet qui se déforme reste inchangé tout au long du processus de déformation plastique.[12]

On distingue les déformations plastiques suivantes :

Déformations plastiques sous contraintes mécanique : elles sont dues à un dépassement de la limite élastique du matériau. Une inspection des pièces vérifiant l'apparition d'une zone de striction peut prévenir le risque d'une rupture prochaine.[9]

Déformation plastique sous contrainte thermique et dans le temps : c'est le fluage, qui est une déformation apparaissant sous contrainte mécanique associée à des températures de service supérieures à 40% de la température de fusion.[9]

I.3.3 Défaillances par rupture fragile :

La rupture fragile ou la rupture par clivage s'accompagne de très peu de déformation plastique. La rupture se produit alors que les déformations sont purement élastiques. Dans les alliages métalliques ce type de rupture est soit :

- Trans-granulaire: rupture par clivage ou par glissement dans un grain.
- Intergranulaire : rupture par glissement le long des joints de grain.

Le clivage se produit préférentiellement le long de plan cristallographique bien définis selon les matériaux cubiques centrés (CC) alors que les cubiques à face (CFC) clive difficilement.[9]

I.3.4 Défaillances par rupture ductile :

La rupture ductile se caractérise par une forte énergie de rupture, une importante déformation à rupture, et par la possibilité de déformation plastique importante. Elle se manifeste essentiellement par la présence des inclusions ou précipités. Elle résulte de la naissance des cavités, l'allongement de ces cavités dans le sens de déformation de celles-ci par striction ou cisaillement qui conduisent à la rupture finale. Les défauts responsables de l'amorçage dans la rupture ductile sont essentiellement les éléments d'addition dans les alliages. A l'échelle macroscopique, on voit des microreliefs appelées cupules. [9]

Dans les matériaux des gazoducs alliés, il existe des particules composées de différents éléments d'alliages très fragiles et ne peuvent accommoder la déformation plastique de la matrice. Comme ces particules ne peuvent pas se déformer aussi facilement que la matrice, elles perdent leur cohérence avec la matrice quand une déformation plastique intense se produit dans leur voisinage et permettent la formation de minuscules trous qui croissent par glissement et qui provoquent la rupture.[9]

La figure suivante présente les modes de rupture :

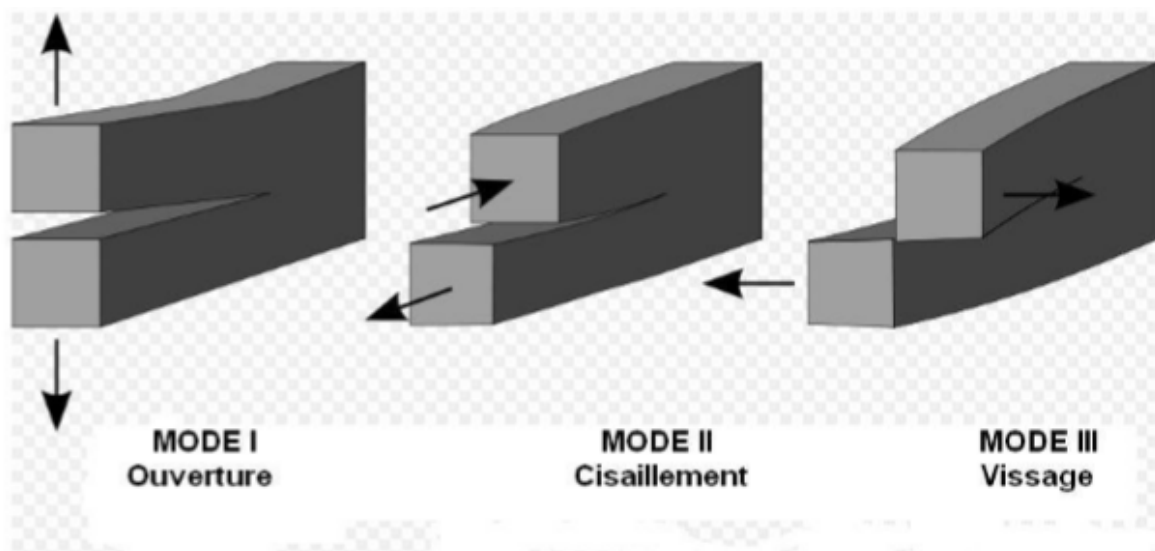


Figure I.13 : Modes de ruptures

Mode I : mode de cisaillement dans le plan, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont perpendiculaires à la direction de propagation[13]

Mode II : mode de cisaillement dans le plan où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles à la direction de propagation.[13]

Mode III : mode de cisaillement hors du plan, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles au fond de la fissure.[13]

I.3.5 Corrosion des pipelines :

I.3.5.1 Définition :

La corrosion des pipelines est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécaniques sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol, l'atmosphère, l'eau ou d'autres fluides. Compte tenu du nombre important de paramètres intervenant dans le processus électrochimique, la corrosion est un phénomène très complexe.[11]

Les figures suivantes présentent des exemples de la corrosion interne et externe .



Figure I.14 : Corrosion interne dans la pipe



Figure I.15 : Corrosion externe dans la pipe

I.3.5.2 Les types de corrosion :

✓ Corrosion uniforme

La corrosion uniforme est caractérisée par un taux de corrosion relativement uniforme sur l'ensemble d'une surface exposée. Ce type de corrosion est habituellement prévu pour les pièces faisant partie d'élément structural qui peuvent être sacrifiés au fil du temps, mais elle affecte tous les métaux communs. Dans le cas des aciers au carbone, le fer réagit avec l'oxygène pour former de la magnétite minérale, qui est de l'oxyde de fer dont la formule chimique est Fe_3O_4 . [9]

✓ Corrosion par piqûre et corrosion caverneuse

La corrosion par piqûre et la corrosion caverneuse sont des cas particuliers de la corrosion galvanique dans lesquels la perte de métal est localisée sur une zone de métal relativement petite. Dans de tels cas, la corrosion se produit à cause des différences de concentration localisées de l'oxygène ou d'un ion agressif, par exemple un ion de chlore, ou encore à cause d'une différence de pH. La corrosion par piqûre est associée au tartre et aux dépôts d'impuretés qui forment une barrière entre l'écoulement principal et l'eau stagnante piégée sous le tartre ou les dépôts d'impuretés. Dans ces conditions,

l'oxygène dissous dans l'eau industrielle ne peut pénétrer le tartre. En l'absence relative d'oxygène, le métal sous le dépôt devient anodique, c'est-à-dire qu'il tend à se dissoudre et à former une piqûre profonde. [9]

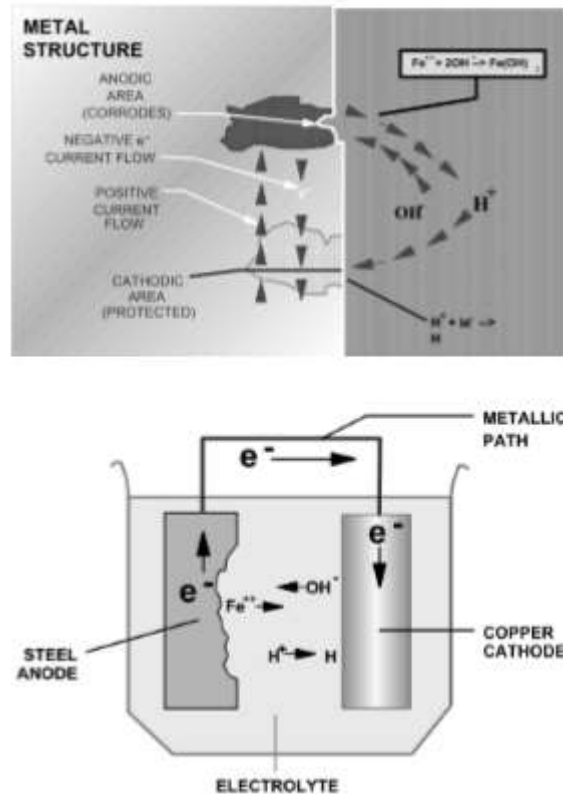


Figure I.16 : Corrosion par piqûration

✓ **Corrosion induite microbiologiquement (CIM)**

Les bactéries, que l'on trouve couramment dans l'eau stagnante, favorisent la corrosion induite microbiologiquement (CIM). Le phénomène peut se produire avec ou sans oxygène, parce que certaines bactéries ont évoluées de manière à se reproduire dans l'une ou l'autre condition.[14]

La figure suivante présente la corrosion bactérienne.

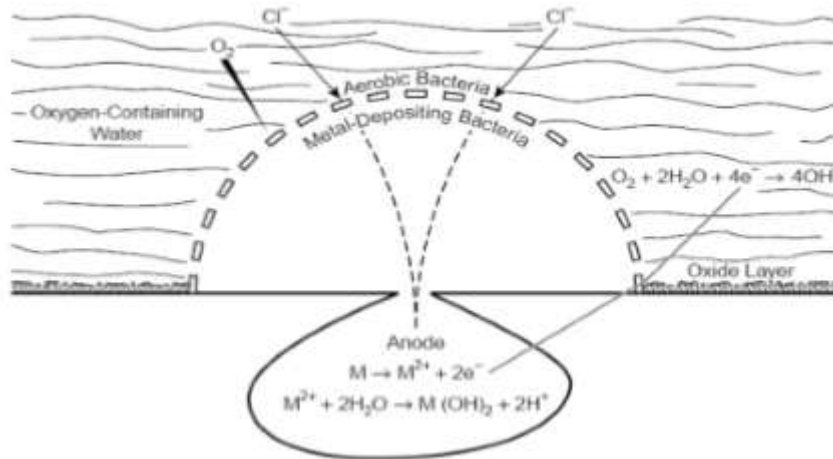


Figure I.17 : Corrosion bactérien

I.3.6 Erosion :

Le processus d'érosion est un phénomène surfacique associé à un enlèvement de matière causé par des impacts répétés des particules solides sur le matériau. Le problème d'érosion touche plusieurs secteurs industriels tels que les tuyaux, les réservoirs, les turbines, les composants hydrauliques, les pompes, les industries de procédés,...etc.

En fait, l'élimination complète de l'érosion du matériau est impossible, mais l'étude des caractéristiques du matériau et le mécanisme de rupture est une manière de comprendre la cause de rupture qui permet de minimiser l'endommagement. [9]

I.3.6.1 Théorie de l'érosion :

Le phénomène d'érosion des matériaux par des particules solides est un processus assez complexe. Les chocs entre les particules solides et la surface d'un matériau entraînent l'enlèvement de matière. Les types et les dimensions des fissures qui se forment sur la surface, durant l'impact, sont largement étudiés et dépendent de plusieurs facteurs : forme, masse, vitesse des particules, dureté et ténacité du matériau. [4]

I.3.6.2 Mécanisme de l'érosion par des particules solides :

Les actions mécaniques, chimiques et thermiques sont l'origine des séparations de la matière tel un débris d'érosion. En général, on distingue quatre mécanismes principaux d'érosion par impact des particules solides : coupe, fatigue, rupture fragile et fusion.[8]

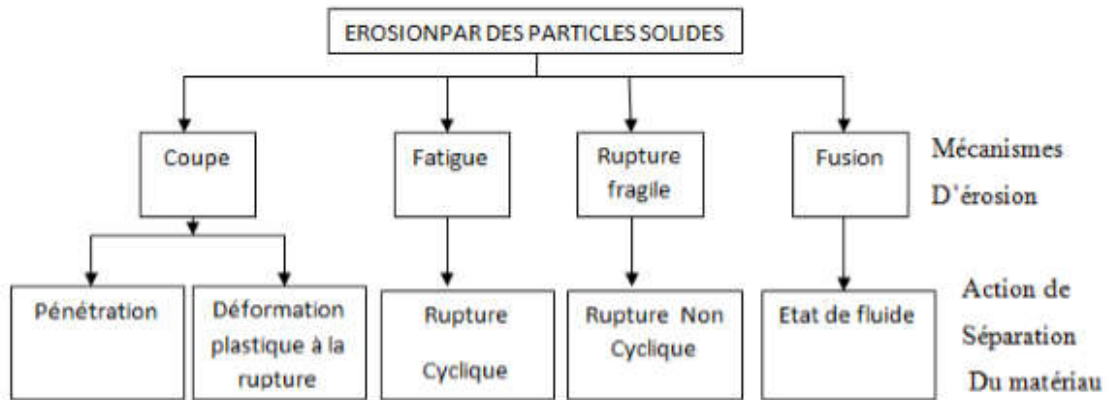


Figure I.18 : Mécanisme d'érosion par des particules

On suggère les mécanismes possible de l'érosion par impact des particules solides : érosion abrasive, fatigue de surface, rupture fragile, déformation plastique.

❖ **Erosion abrasive (Coupe)**

Lorsque des particules frappent une surface à faible angle d'impact, le mécanisme est appelé érosion abrasive. Quand le sable abrasif frappe une surface, il roule ou glisse provoquant l'érosion par frottement ou par découpage. La matière est enlevée par griffures ou par démolition des bords aigus des particules, en formant de petites cicatrices.[4]

❖ **Fatigue de surface**

Ce mécanisme d'érosion ressemble à l'usure par fatigue des surfaces roulées. Lorsque les particules frappent une surface avec un grand angle d'impact et une basse vitesse, la surface ne subit aucune déformation plastique. Cette surface est affaiblie par fatigue, et des fissures apparaissent après des impacts répétés. Les particules se détachent de la surface après plusieurs impacts.[4]

❖ **Déformation plastique**

La déformation plastique de la surface a lieu en raison de la formation des écailles autour du point d'impact, lorsque les particules frappent la surface élastique avec une vitesse moyenne et un grand angle d'impact. En répétant l'impact sur les écailles, le matériau se détache tels des débris. [4]

❖ **Rupture fragile**

Lorsque les particules impactent une surface fragile avec un grand angle d'impact et une vitesse moyenne, l'érosion se fait par rupture fragile. Si les particules sont aigues, la fragmentation fragile s'effectue par détachement des particules de la matière. [4]

I.3.7 Enfoncements :

Un enfoncement dans un pipeline est une déformation plastique permanente de la section circulaire de la paroi du tube due à un impact avec un corps étranger (exemple : le godet d'un engin en travaux pour les canalisations enterrées ou posées par terre, les ancrs des bateaux pour les pipelines immergés). Autrement dit un enfoncement est un changement de la courbure de la paroi du pipeline sans changement d'épaisseur. La profondeur de cet enfoncement est définie comme la réduction maximale du diamètre de tuyau par rapport à son diamètre initial (voir Figure I.19]

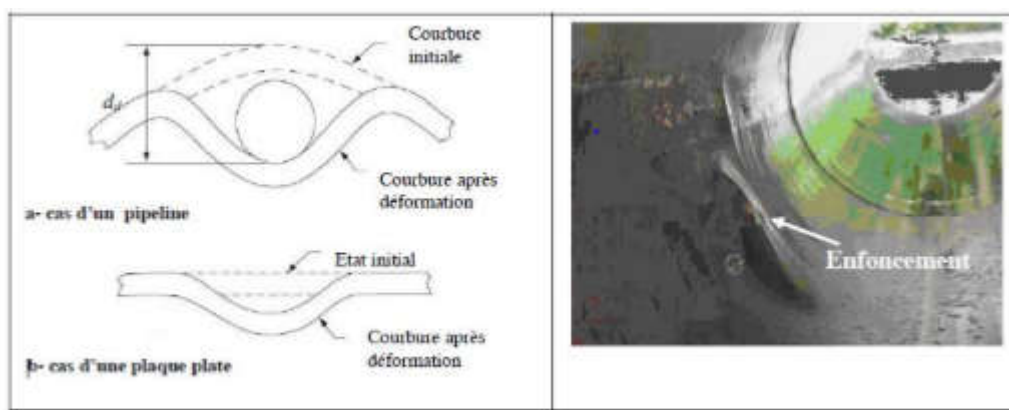


Figure I.19 : Géométrie enfoncement et une photo d'un pipeline enfoncé

Un enfoncement provoque une concentration locale de contrainte et de déformation et une réduction locale du diamètre du tuyau. La présence des enfoncements dans les tuyaux peut se résumer au cas suivant :

- Indentation lisse (Plain dent) : ce type d'enfoncement correspond à celui où il n'y a pas de réduction de l'épaisseur de la paroi du tube.
- Indentation pliée (Kinked dent) : C'est un enfoncement qui provoque un changement brusque de la paroi du pipeline.
- Indentation dans des soudures : Cette configuration traduit la combinaison d'un enfoncement et d'un autre défaut car les soudures sont susceptibles de présenter des fissures... [11]

I.3.8 Les éraflures :

Une éraflure est un endommagement superficiel de la surface due à un contact avec un objet étranger qui provoque un enlèvement de matière (Figure I.21). Cette éraflure peut être considérée comme une entaille. Les dimensions d'une éraflure sont définies de façon que la longueur soit plus grande que la largeur.[11]

Le choc causé par l'agression externe peut néanmoins provoquer de graves endommagements au tuyau. En service, l'action de la pression pourra provoquer une rupture localisée qui provoquera elle-même une fuite et éventuellement une explosion.[11]

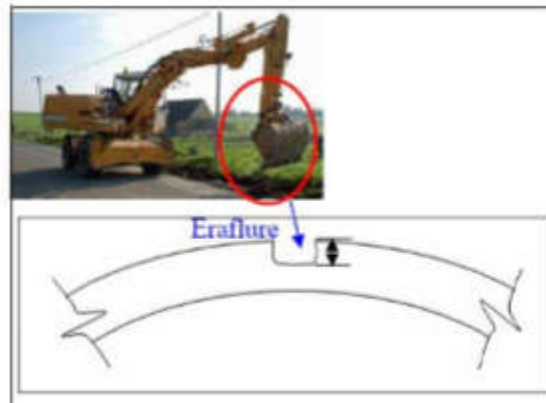


Figure I.20: engins provoquant une éraflures et géométrie d'une éraflure [11]

I.3.9 Les défauts combinés (enfoncements et éraflures) :

Un enfoncement est une déformation plastique permanente de la section du pipeline due à un contact avec un corps étranger (agression externe), ce même contact peut aussi provoquer un enlèvement de la matière. Dans ce cas, on se retrouve dans une situation où on a un défaut combi

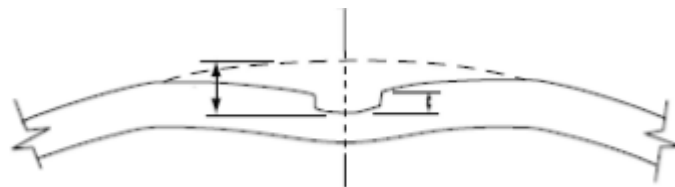


Figure I.21 : Géométrie d'un défaut combine



Figure I.21 : Photo d'une éraflure dans un enfoncement

(La présence d'un défaut tel qu'un enfoncement et éraflure dans une canalisation est très dangereuse. En effet, en plus de la concentration de contraintes provoquée par l'agression externe, il y'a aussi une réduction de l'épaisseur du pipeline due à la présence de l'éraflure. En conséquence, on constate une diminution locale de la résistance mécanique de la canalisation.[11])

Conclusion

Le système de transport des hydrocarbures par pipeline est un système en évolution à travers le monde.

On retiendra que les aciers sont exposés à des sollicitations mécaniques chimiques, thermiques aboutissant à des défaillances de différents types comme la fissuration, la corrosion, les déformations, les ruptures,... comme il a été développé dans notre chapitre. Ainsi donc l'environnement défavorable et les dommages dans les conduites a conduit à explorer différentes options de réparation pour les garder fonctionnels.

II. Chapitre II :

Techniques de détection et méthodes de réparation des défauts dans les pipelines

Introduction :

Nous avons vu dans le précédent chapitre que l'exploitation des réseaux de canalisation est confrontée à des problèmes notamment des défaillances, dues à des causes, externes telles que l'environnement, les charges appliquées, le procédé d'installation ou parfois inhérentes aux matériaux ou aux procédés de fabrication des pipelines. Ces défauts peuvent entraîner à court, moyen ou long terme des dégâts pour les hommes, les animaux ainsi que l'environnement.

La détection de ces défauts ainsi que la prise en charge rapide du problème est donc indispensable pour éviter des catastrophes qui peuvent être d'ordre économique ou environnemental. Pour ce faire il existe non seulement des méthodes ou technique pour détecter ces défauts, mais aussi des techniques de réparations.

- Quelles sont les techniques de détections dont dispose l'industrie pour détecter les défauts
- Quelles sont les méthodes de réparation adaptée.

Voici les questions auxquelles nous tenterons d'apporter une réponse dans ce chapitre.

II.1 Techniques de détection des défauts dans les pipelines :

La détection des défauts consiste à l'inspection des réseaux de pipelines dans les canalisations, en effet, L'inspection est l'ensemble des théories et procédés aptes à fournir les informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure.[13]

Les pipelines étant soumis à des efforts internes des produits [gaz ou pétrole] (boostés par des pompes) et des efforts externes comme il a été indiqué auparavant, des inspections deviennent plus que nécessaire.

- La détection visuelle
- La détection par radiographie
- La détection par ultrason
- La détection par outils intelligent)

II.1.1 Détection visuel :

Une équipe de contrôleurs expérimentés inspecte toutes les surfaces extérieures du tube. Ils signalent toutes les anomalies d'aspect ou de forme qui pourront être corrigés.

Notons que cette détection visuelle peut se faire selon un échéancier préétabli souvent appelé plan de maintenance préventif et intègre la politique préventive des entreprises.

II.1.2 Détection par radiographie :

C'est une méthode qui utilise la propriété des rayons X ou γ de faibles longueur d'onde, aptes à traverser la matière. L'intensité du rayonnement est modifiée selon sa traversée selon qu'il rencontre le matériau sain ou les défauts inclus, en effet, un récepteur radiographique placé derrière l'objet enregistre les variations du faisceau émergent ce qui se traduit par une image ou un film comportant des différences de densité ou contraste, montrant les imperfections de la matière.[7]

Ce contraste entre l'image d'un domaine contenant un défaut et celle d'un domaine exempt de défaut permet à l'observateur de distinguer l'imperfection.

Cette méthode permet :

- La détection de la corrosion interne ou externe des tuyauteries calorifugées ou non
- La recherche d'obstructions de tuyauteries ou d'accessoires

Cette technique est surtout utilisée dans le cadre de la politique préventive conditionnelle des entreprises pour identifier d'éventuels défauts préalablement constatés

II.1.3 Détection par ultrasons :

Pour des raisons de sûreté et des exigences de construction en eaux profondes ainsi qu'opérationnelles toujours plus strictes, le contrôle automatisé par ultrason remplace progressivement le contrôle radiographique pour l'inspection des soudures circulaires de pipelines. [15]

Cette technologie utilise les temps de parcours d'une onde ultrasonore (perpendiculaire à la surface des tubes) dans le fluide transporté et le métal des tubes pour évaluer la distance entre le capteur et les faces internes et externes des tubes sur lesquelles l'onde se réfléchit partiellement. La différence de ses deux distances permet d'avoir une lecture directe de l'épaisseur du tube mais elle est très sensible à la propriété interne des tubes.[15]

II.1.4 Détection par outil intelligent :

C'est une technologie de pointe qui permet de détecter les déformations, fissures à l'endroit exacte sur de longues distances de canalisations. Cependant il y'a des cas où on ne peut pas utiliser l'outil intelligent. Nous pouvons citer :

- La canalisation télescopique La canalisation courte ou de petit diamètre - Coudes et cintrages de faible rayon [13]

Parmi ces moyens de détection nous pouvons citer :



Figure II.1 : Outil intelligent d'inspection

Cette technique utilise de puissants aimants induisant un flux magnétique dans la parois de la conduite. Des capteurs placés entre les pôles détectent tout changement d'intensité résultant d'une perte de métal ou d'un changement d'épaisseur. Ces capteurs ce sont considérablement améliorés au point où la détection des pertes de métal est même possible au niveau des cordons de soudure et sur la face interne et externe de la parois. Ils peuvent même être adaptés pour mesurer l'épaisseur de la conduite. [13]

II.2 Méthodes de réparation des pipelines :

Après l'évaluation de l'endommagement des pipelines, s'effectuera le choix du type de réparation selon :

- La géométrie de la canalisation (diamètre, cintrage...)
- La nuance de fabrication de l'acier
- La localisation de la canalisation
- Les conditions d'exploitation
- La localisation du défaut
- La nature et dimension du défaut. [17]

Ainsi donc nous disposons d'une panoplie de technique de réparation.

Nous pouvons cités les principales techniques de réparations par patch en composite telle que

- Les réparations par collage
- - Système de réparation par renforcement des fibres composites

Cependant il existe d'autre technique de réparation telle que

- La méthode de meulage
- La méthode de perçage
- La réparation par demi
- Coquille soudée
- Ré-enrobage
- Coupe et remplacement après vidange.

II.2.1 Réparation des pipelines par patch en composite :

Les matériaux composites ont été employés pour la réparation des structures des pipelines et d'autres équipements pendant plusieurs années. Cependant, l'utilisation originale des matériaux composites était de réparer les canalisations corrodées avec l'intention de renforcer la section endommagée de la canalisation. En plus de réparer la corrosion, les matériaux composites ont été utilisés avec succès pour réparer des entailles, des fissures et des canalisations offshore. Aujourd'hui, la plupart des compagnies d'exploitation de pipelines utilisent principalement les matériaux composites dans les programmes de réhabilitation et de réparation.[18]

II.2.1.1 Réparation par collage :

Les matériaux composites sont des matériaux performants constitués par l'association à l'échelle microscopique de plusieurs matériaux aux caractéristiques complémentaires. Cela permet d'associer un ensemble de propriétés mécaniques ou physiques qu'il serait impossible à obtenir avec les composants prisent de façon isolée. Outre le gain de poids, un autre avantage des matériaux composites est le caractère multifonctionnel qui leurs est conféré par leurs propriétés orthotropes. Ils sont en effet plus largement utilisés au fur et à mesure que les connaissances concernant le processus de

fabrication, leurs caractéristiques mécaniques et physiques ainsi que leur durabilité et comportement sous charge s'accumulaient.[19]

Dans notre cas, nous allons nous axer plus sur les matériaux composites à fibre et résines.

La caractérisation des matériaux composites à base de fibres et de résines est généralement complexe. Contrairement aux matériaux métalliques qui demande un nombre relativement restreint d'essais, les composites à base de fibre et de résines se distingue par la nécessité d'une multitude d'essai afin d'aboutir aux caractéristiques mécaniques.[20] et [21]

La figure suivante présente la réparation par composite d'une pipe en acier.

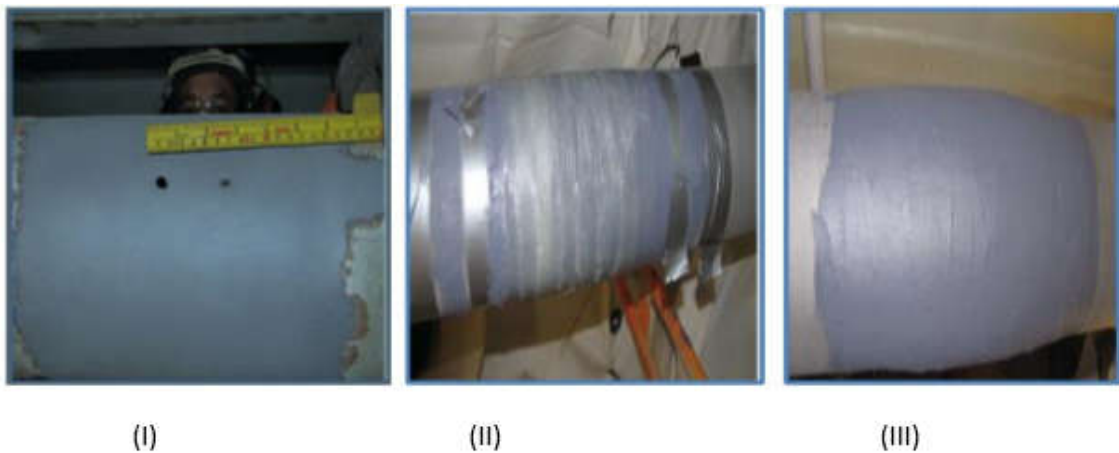


Figure II.2 : Réparation par composite une pipe en acier

II.2.1.2 Système de réparation par renforcement des fibres composites :

Généralement, les systèmes de réparation par collage de composite peuvent être classés en deux types : Système de réparation par matériaux composites pré-durci « Precuredlayered » et système de réparation par matériaux composites flexible « Flexible wetlay-up system » qui sont appliqués dans la réparation des pipelines défectueux.

✓ *Système de réparation par matériaux composites flexible*

Le système de réparation par matériaux composites flexible est intensivement utilisé pour l'industrie de réparation des pipelines enterrés sous la forme de suremballage des pipes d'acier même aux angles ou des courbures pour une vaste gamme d'application de pression. Cette application utilise la matrice de résine qui est généralement à l'état non solidifié. Leurs solidifications est réalisée après leur mise en place sur la structure.

Ce système de réparation utilise un matériau composite qui est imprégné avec des systèmes de résines différents (verre, carbone, armide...) pour tenir compte des conditions environnementales spécifiques, telles que les applications sous-marines, les températures élevées et le froid.

Le système de réparation par matériaux composites flexible est adapté pour les réparations de surfaces externes ou pour la probable progression de la corrosion et pour rétablir la résistance du pipeline contenant un défaut à la parois. Ce système est également adapté aux conditions souterraines pour des applications relativement à faible et à moyenne pression. Toutefois, en raison de la complexité de préparation, d'application et de durcissement de la résine pour les systèmes flexibles, il est souvent souhaitable d'utiliser un manchon spiral pré-durci. [9]

La figure suivante présente l'emballage d'un composite flexible pour la réparation d'une conduite sous – marin.

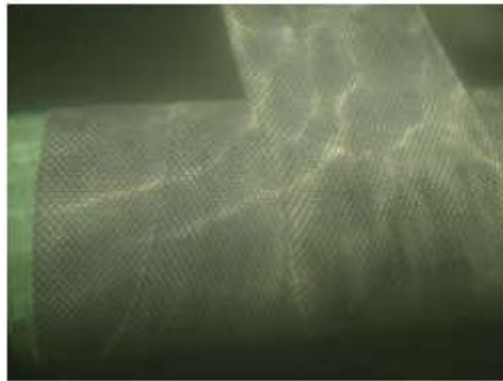


Figure II.3 : Emballage de composite flexible pour la réparation sous-marine

✓ **Système de réparation par matériaux composites pré – durci**

Le système de réparation par matériaux composites pré – durci comprend le collage de matériaux composites renforcés par des fibres pré – durcis qui est tenu ensemble avec un adhésif appliqué sur le terrain. La figure II.4 montre le système de réparation ClockspringR qui est intensivement utilisé dans l'industrie de réparation des pipelines [23]. Ce type de système de réparation est un enroulement de matériau composite à haute résistance avec une structure qui lui permet d'envelopper en toute sécurité autour des pipelines. Les couches sont scellés ensemble avec un agent de liaison solide. Le défaut est rempli avec du mastic adhésif pour aider à l'appui et au transfert de charge avant leur installation.[9]

Cette méthode de réparation est fiable pour les défauts extérieurs. La plupart des technologies de réparation moyennes sont basées sur ce principe. Cependant, la réparation à l'aide de ce système est généralement limité à des sections droites de tuyau. Elle nécessite un grand espace pour appliquer ce système sur le pipeline défectueux. En outre, l'application sous – marine de ce système est difficile car elle consiste à une application interne de la colle pour le système en couche. Ainsi, la liaison des couches et leurs performances ainsi que l'installation sont les principaux inconvénients de ce système de réparation. [9]

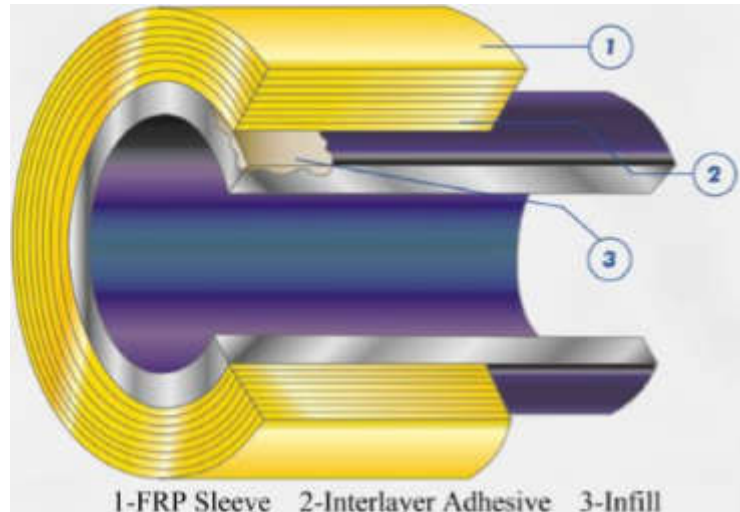


Figure II.4 : Réparation par renforcement composite type clostriping [24]

II.2.2 Autres méthodes de réparation des pipelines :

Il est bien connu que la singularité en pointe de défaut (fissure, entaille) contribue à accentuer sa progression. Ce qui tend à réduire la durée de vie des structures endommagées. Une des techniques les plus répandues permettant de réparer les effets néfastes d'un défaut, consiste à éliminer cette singularité par enlèvement de matière [13]. Dans ce cas on trouve le meulage et le perçage au voisinage du défaut.

✓ Méthode de meulage

Cette technique de réparation est basée sur le principe d'élimination des défauts par enlèvement de matière comme le montre la figure II.5. Elle permet ainsi d'éliminer la singularité créée par le front de la fissure [13]

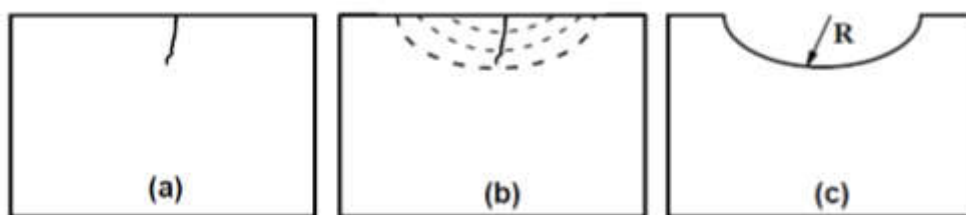


Figure II.5 : Méthode de meulage, (a) défaut de fissure, (b) réparation par meulage, (c) structure après réparation

C'est une technique simple qui nécessite des moyens moins coûteux. Le meulage peut donner de bons résultats en termes de durée de vie des structures réparées. Cependant, cette technique peut fragiliser la structure du fait de la diminution localisée de la section. Cela nécessite une vérification par calculs de la tenue mécanique de telles structures après réparation.[13]

Elle est souvent recommandée dans le cas des réparations des fissures dans des structures épaisses. Elle est aussi utilisée comme technique de parachèvement dans le cas des joints soudés en vue de permettre l'extension de leur durée de vie [13].

✓ Méthode de perçage

Le perçage d'un trou en fond d'une fissure permet un arrêt temporaire de la propagation de la fissure. Cette méthode est basée sur la modification géométrique en fond de la fissure. C'est une méthode largement répandue pour la réparation des structures métalliques endommagées. Elle est effectuée dans le but d'en augmenter la durée de vie ce qui entraîne une réduction de la contrainte maximal (figure II.6). Cette technique apporte différents avantages ; elle est simple à réaliser, reproductible et utilisable pour des structures qui ne sont accessibles que dans un seul côté. Elle permet de garder la structure en service en attendant un éventuel changement de la pièce endommagée. L'amorçage de la fissure est retardé par le perçage du trou et la durée de vie augmente avec l'accroissement du diamètre du trou. Le perçage d'un ou plusieurs trous autour du défaut est une autre méthode proposée par plusieurs chercheurs pour réparer la structure fissurée [13].

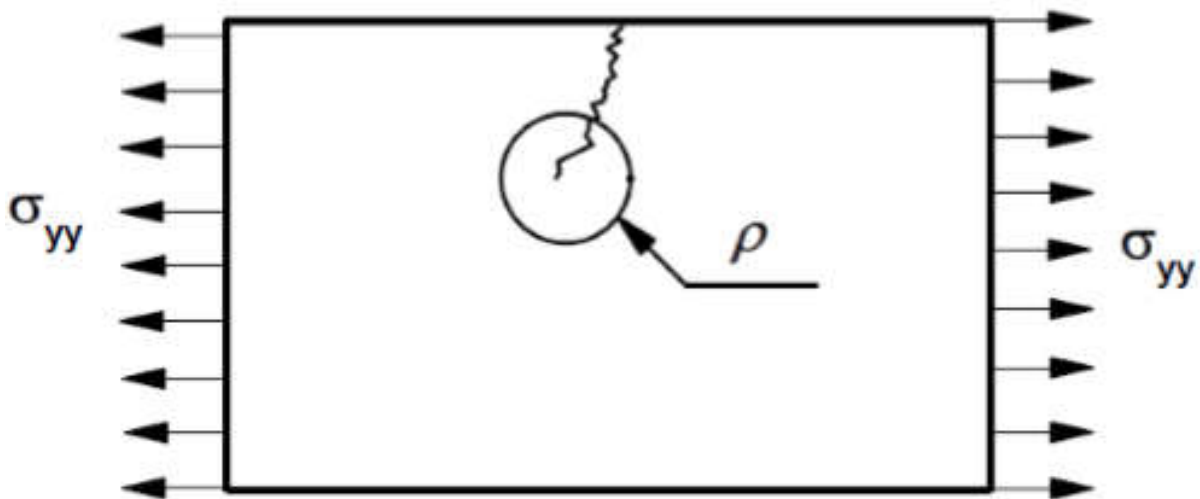


Figure II.6 : Perçage au fond de la fissure

Ce processus de réparation cause le retard de propagation de la fissure. Un plus grand rayon de trou réduit le facteur de concentration de contrainte, mais il faut cependant faire attention à la diminution de la section du ligament restant.

Dans d'autres études, il existe une approximation pour le facteur de concentration de contrainte [16]. Pour un trou percé en fond d'une fissure le facteur de concentration de contrainte est donné par la formule suivante :

$$K_t = 1 + 2\sqrt{a/\rho}$$

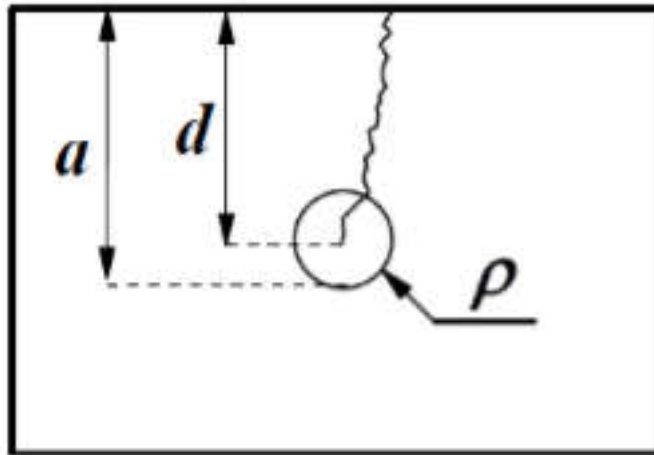


Figure II.7 : Dimensions géométriques de la fissure et trou de réparation

Avec d est la longueur initiale de la fissure, ρ est rayon du trou percé, $a=d+\rho$ est la longueur de la fissure après perçage

En plus du meulage et du perçage il existe d'autres méthodes à savoir la réparation par demi-coquilles soudées, le ré-enrobage ainsi que la méthode de coupe et remplacement après vidange.

✓ **Réparation par demi-coquilles soudées**

La procédure de réparation en charge des canalisations de transport d'hydrocarbures par l'installation de demi-coquilles soudées renforce la zone défectueuse contenant toute éventuelle fuite, et est par conséquent utilisé pour réparer des défauts débouchant ou non débouchant d'orientation axiale ou circonférentielle.

La figure suivante présente la géométrie de demi-coquilles :

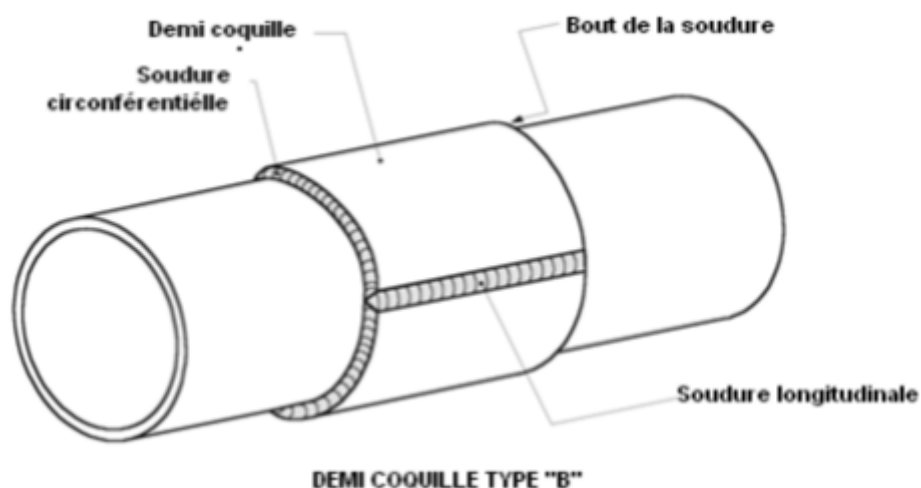


Figure II.8 : Géométrie de demi-coquilles [25]

Les demi-coquilles soudées permettent de réparer les défauts suivant :

- Corrosion internes et externes
- Enfoncements simples ou combinés à d'autres défauts
- Entailles et rayures
- Fissures au niveau du corps du tube ou du cordon de soudure circumférentielle

✓ **Ré-enrobage**

Ce type de réparation s'effectue dans le cas où l'enrobage a été touché ou après une intervention sur le pipeline pour remettre son isolation initiale.



Figure II.9 : (a) réparation de surface pour réfection enrobage, (b) fuite de bentalha (oran, algerie) [26]

Il faut procéder comme suit :

- Préparation de la surface
- Choix du revêtement adéquat (compatibilité)
- Application du revêtement sur la conduite
- Contrôle du revêtement
- ✓ **Coupe et remplacement après vidange**

Cette méthode est préconisée lorsque la partie endommagée perd les propriétés mécaniques pour lesquelles le pipeline a été conçu.



Figure II.10 : Changement de tronçon endommagé d'une canalisation, (a) découpe, (b) résoudage [27]

La réhabilitation apportée consiste au changement partiel de la ligne de canalisation vu le coût élevé de cette opération, elle reste la solution finale pour réparer la structure endommagée.

Conclusion

Dans ce chapitre, notre travail s'est porté sur les techniques de détection des défauts dans les pipelines ainsi que les techniques de réparation de ses défauts. Parmi les différentes méthodes de réparation citées, la réparation par collage d'un patch composite semble la plus prometteuse pour résoudre rapidement et à moindre coût les dommages de canalisation.

III. Chapitre III

*Modélisation numérique de la
réparation des pipes par composite*

Introduction :

Le secteur industriel doit faire face au remplacement des structures ou des composants présentant des signes de rupture, des fissures ou des anomalies diverses. En raison des contraintes de sécurité qui amènent à utiliser les structures dans de bonnes conditions de fiabilité, maîtrisées aussi longtemps que possible, des inspections sont périodiquement programmées pour détecter les défauts ou les dommages. En générale les structures métalliques sont soumises en service à des sollicitations mécaniques donnant lieu à des états de contraintes généralement multiaxiaux et à amplitude variable, ce qui provoque un phénomène d'endommagement par fatigue. Une alternative à la réparation de ces structures consiste à les renforcer préventivement, avant que la fissure n'apparaisse. Ce renforcement de structures par patchs composites retarde l'apparition de ces fissures. Par conséquent l'utilisation du patch composite pour réparer des structures endommagées est très largement utilisée aujourd'hui [28,29]. Cependant, les études concernant le renforcement préventif restent peu nombreuses et l'apport bénéfique de la réparation par patch en composites en termes de durée de vie des structures est donc à exploiter et à optimiser.

Notre étude se place dans ce contexte, elle porte sur une analyse numérique par la méthode des éléments finis tridimensionnelle, de la réparation par composite d'un pipeline fissuré. Une approche locale de la mécanique linéaire de la rupture fondée sur le facteur d'intensité de contrainte est utilisée pour décrire le comportement d'une fissure réparée et sollicitée en mode d'ouverture.

L'effet de l'avancement et la géométrie de la fissure, l'épaisseur et la longueur du patch sur le facteur d'intensité de contraintes en mode I est pris en considération.

III.1 Présentation du logiciel ABAQUS/CAE :

ABAQUS/CAETM est un code de calcul qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis (M.E.F). Dans ce cadre il présente un système complet intégrant non seulement les fonctions de calculs proprement dites mais également des résultats (post-traitement). ABAQUS/CAETM est un programme qui traite des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statiques et dynamiques, des problèmes non linéaires, des problèmes thermiques etc...

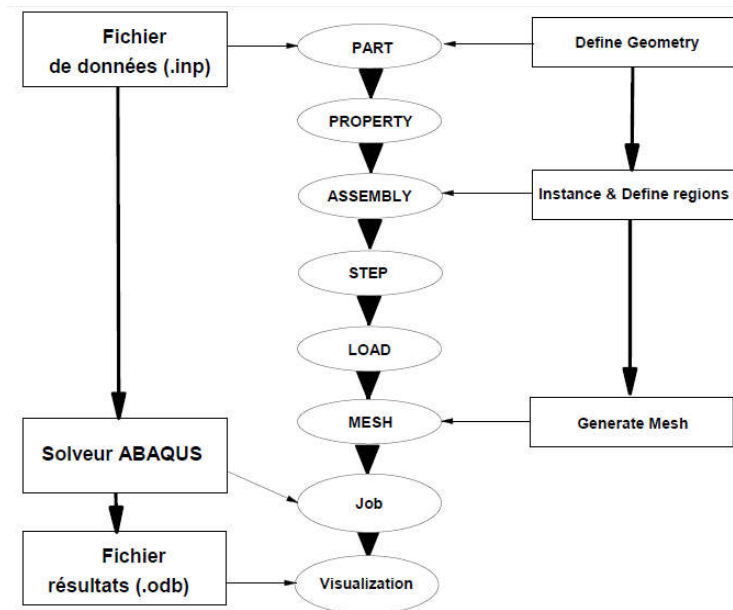


Figure III.11 : Etapes à suivre pour la programmation [30]

Comme le présente la figure III.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.

III.2 Le module Part :

Le module part nous permet de créer tous les objets géométriques rentrant dans le cadre de notre modèle soit en les dessinant dans ABAQUS CAE soit en les important d'un logiciel de dessin (CAO). Dans notre cas il s'agit de la conception du pipeline, de l'adhésif et du patch.

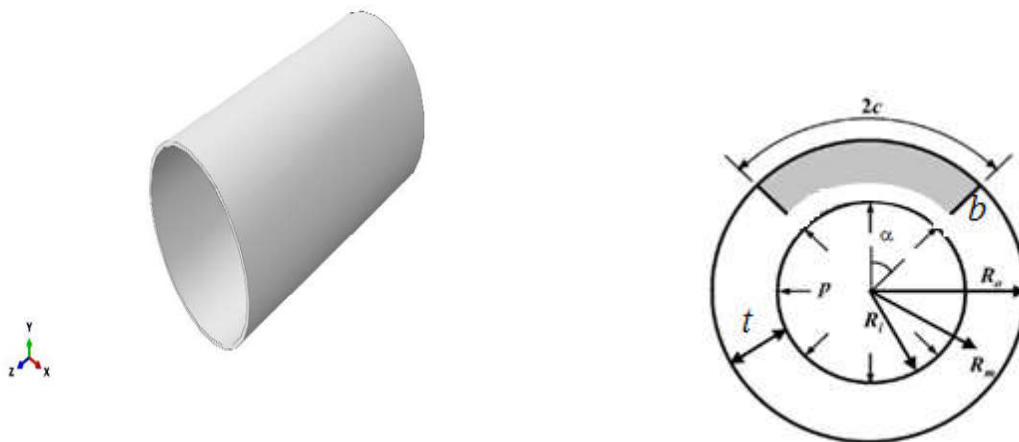


Figure III.2: Le modèle géométrique a) modèle complet

III.3 Le module Property :

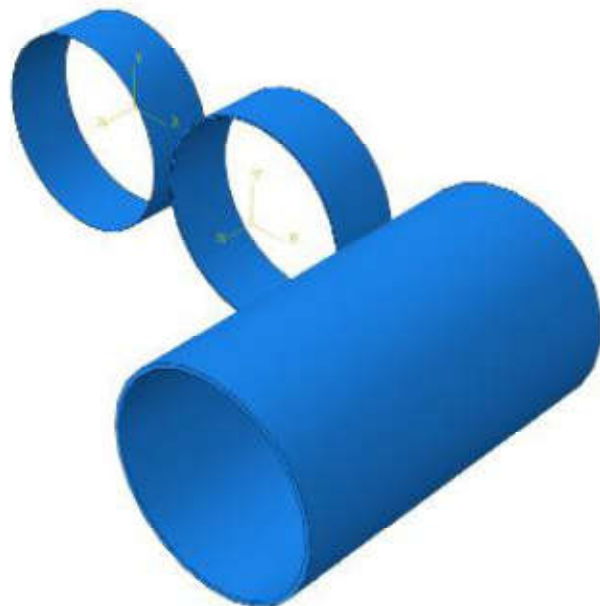
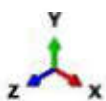
Le module property permet de définir les propriétés des différents composants, Les propriétés mécaniques du pipeline de l'adhésif ainsi que du patch sont illustrés dans le tableau III.1 suivant.

Propriété	Matériaux 1	Matériaux 2	Matériaux3
	API 5L X65	(Patch) Glass epoxy	Adhésif
E_1 (GPa)	210	200	2,21
E_2 (GPa)		25	
E_3 (GPa)		25	
G_{12} (GPa)		7,2	
G_{13} (GPa)		5,5	
G_{23} (GPa)		5.5	
ν_{12}	0,3	0,21	0,43
ν_{13}		0,21	
ν_{23}		0,21	

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques des différents matériaux

III.4 Le module Assembly :

Le module assembly nous permettra d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère.



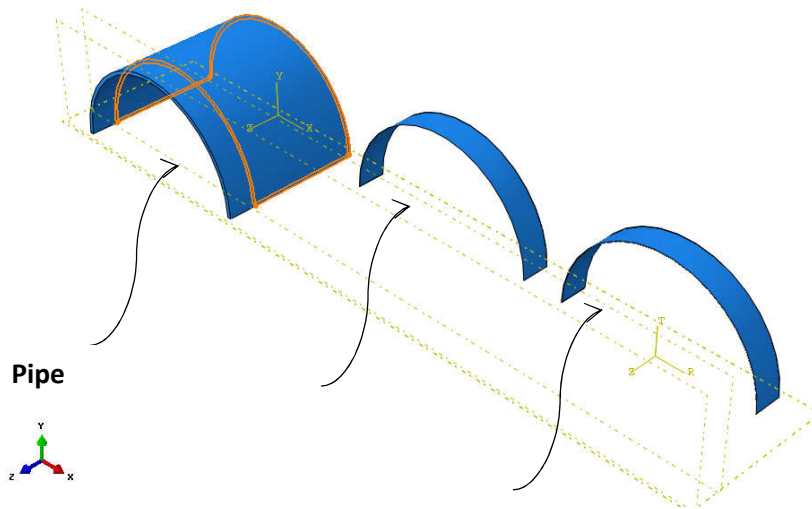


Figure III.4: Assemblage des structures

III.5 Le module Step :

Ce module permet de définir toutes les étapes pour le post traitement, il est possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

Dans ce module ont définies aussi les ressorties de nos résultats, pour notre étude on demande dans le sou-module 'OUTPUT HISTORY' le calcul du Facteur d'intensité de contrainte avec « Maximum tangential stress », la nature de calcul est statique générale.

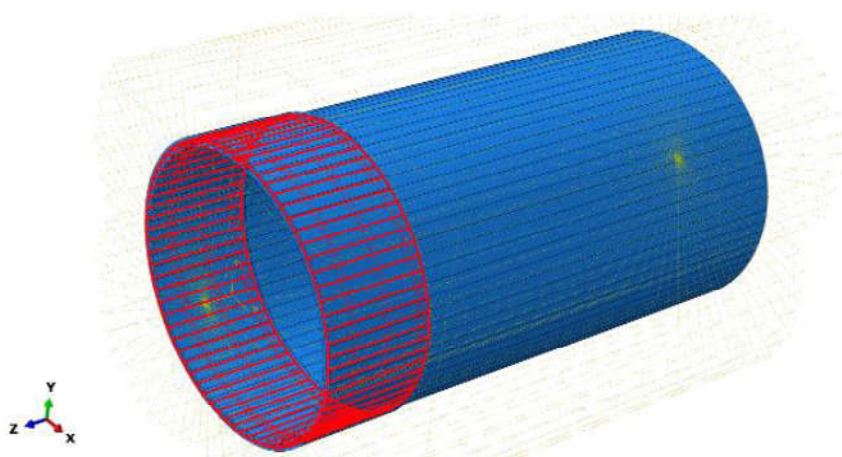


Figure III.5: Modèle géométrique représente ¼ de pipeline

III.6 Le module Interaction :

Le module interaction permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du model, la seule proximité ou contacte entre les points n'étant pas suffisant.

Dans ce module deux interactions sont déclarés à savoir :

- Une interaction de type « TIE » entre le pipe/adhésif et adhésif/patch, tous le paramètres de cette option sont à défaut, a noté que l'adhésif est déclaré toujours comme esclave puisqu'il possède le plus faible module Young.
- Aussi on configure notre fissure dans le pipeline avec un front de fissure (linge de fissure) de direction " Normal to plane".

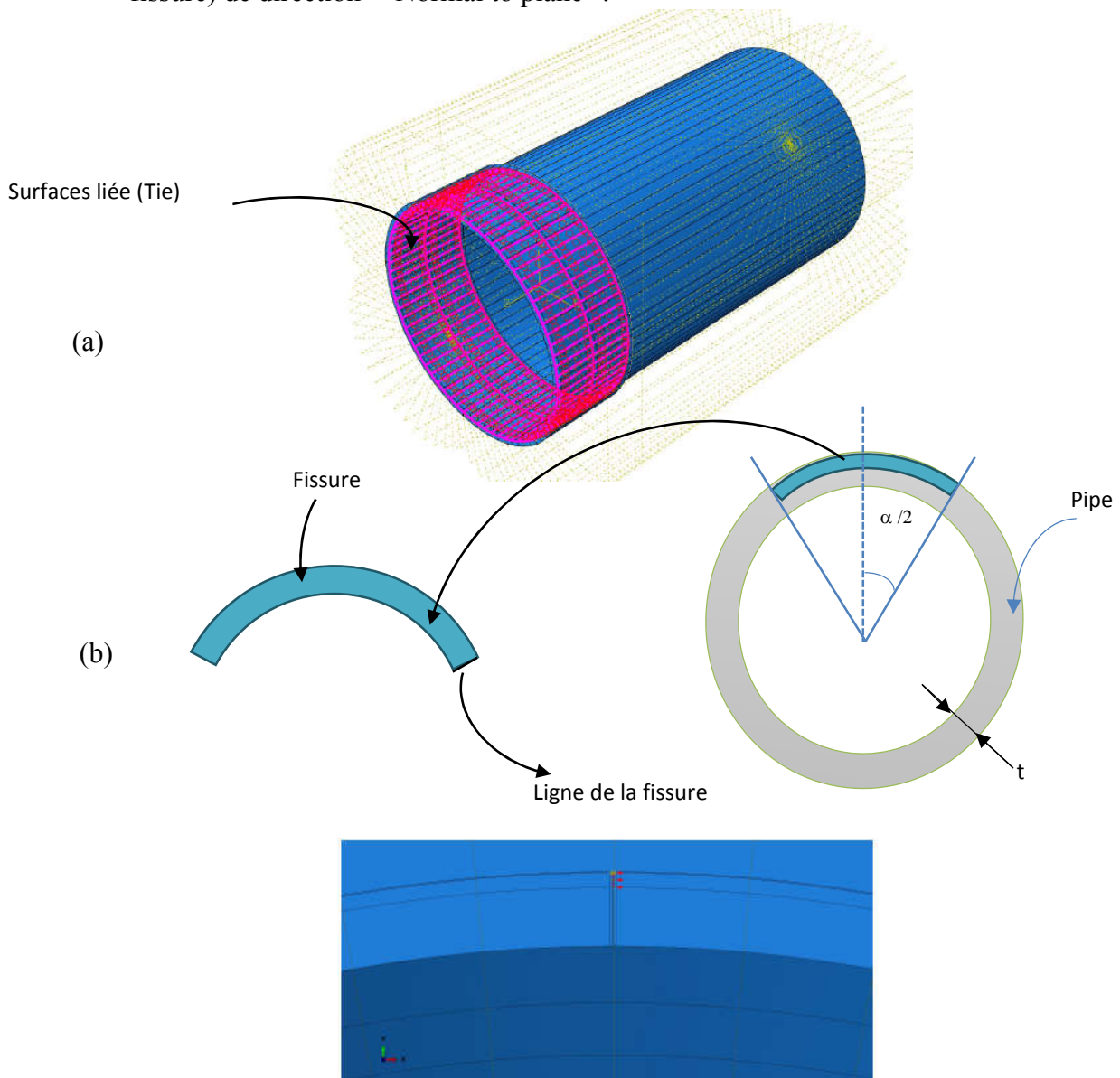


Figure III.6: Déclaration du front de la fissure (b), exemple d'une partie d'interactions coté pipe (a)

III.7 Le module Load :

Dans le module load on détermine toutes les conditions aux limites, tel que la pression les encastremets. Dans la présente étude le pipe est soumis à une pression interne de $P=70 \text{ Bar}=7\text{MPa}$, les deux faces du plan (x, y) sont bloquées suivant l'axe Z et les deux faces du plan (x, z) sont bloquer suivant l'axe Y.

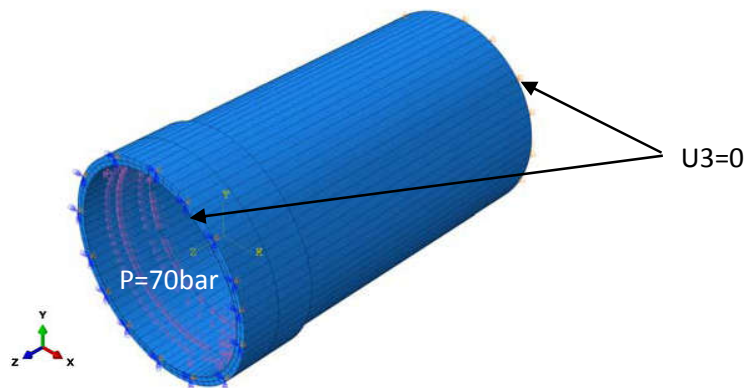


Figure III.7: déclaration des conditions aux limites

III.8 Le module Mesh :

Le module mesh nous permettra de générer un maillage en élément fini sur notre assemblage, le maillage est de type quadratique structuré C3D20R.

Le maillage utilisé est représenté par la figure II.2.2. La forme circulaire du patch composite est identifiable sur cette figure. Un maillage régulier est effectué pour toute la structure. Ce maillage reste le même tout au long du calcul afin d'éviter toute influence du maillage sur les résultats. A ce niveau précisons que le maillage est de type quadratique (hexaèdres).

Un collage parfait est créé entre le pipe et l'adhésif ainsi que l'adhésif et le patch en discrétisant le modèle par intervalle de 5° .

La fissure dans le pipeline entraîne une singularité géométrique provoquant une concentration de contrainte. Par conséquent, un maillage raffiné est effectué autour de la fissure ou la taille des éléments au voisinage du front de la fissure est de $0,08\text{mm}$. Le nombre total d'élément de la structure étant de 103202 c'est-à-dire 102690 éléments pour le pipeline, 256 éléments pour l'adhésif et 256 éléments pour le patch.

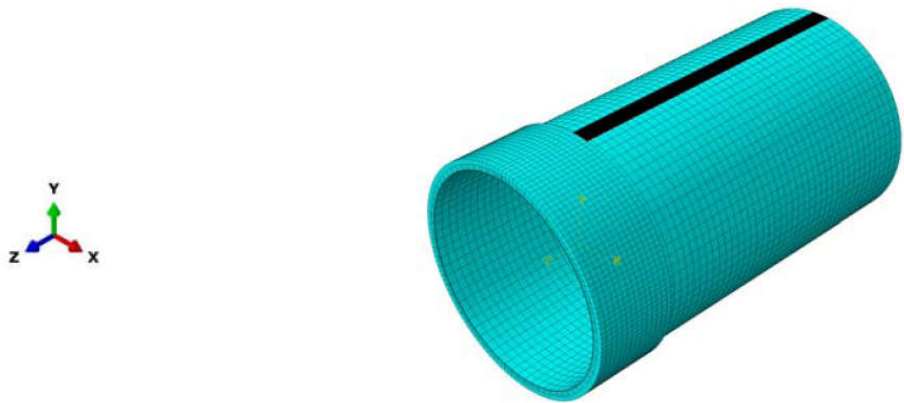


Figure II.2.2 : le maillage du modèle géométrique

III.9 Module Job :

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats dans un fichier *.inp*

III.10 Module Visualisation :

Comme son nom l'indique, ce module nous permet tend autre de visualiser le model et les résultats obtenus, les concentrations de contrainte ainsi que les déformations.

III.11 Modèle géométrique :

Le modèle géométrique du pipeline réparé par le patch en composite est représenté sur la figure III.8. La pipe en acier API 5L X65 est caractérisée par une longueur $L_p=1000\text{mm}$, un rayon extérieur R_{ext} : 350mm, une épaisseur e_{pipe} : 12.7mm. Ce pipeline présente une fissure semi elliptique réparé par un composite en Glass epoxy de dimension $L_{\text{patch}}=200\text{mm}$ et

$e_{\text{patch}}=2\text{mm}$. L'adhésif utilisé est de type epoxy d'épaisseur $e_{\text{ad}}=0.2\text{mm}$ et de longueur $l_{\text{ad}}=200\text{mm}$. Le pipeline est soumis à une pression interne de 70 Bar.

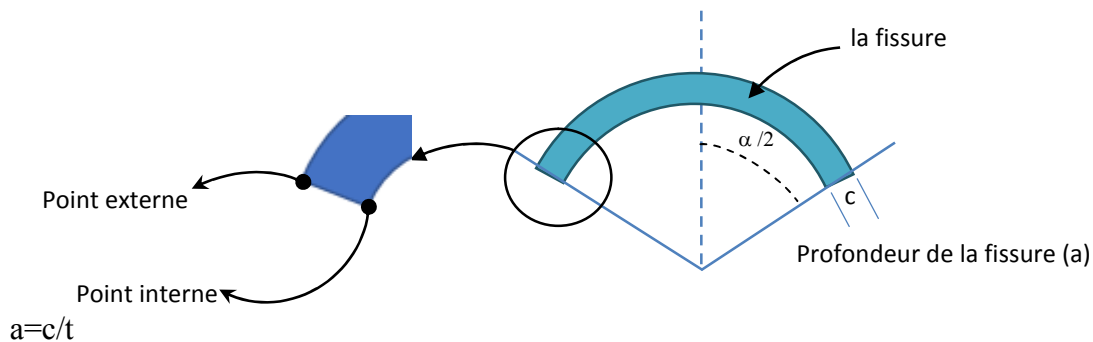


Figure III.11 : Le model géométrique de la fissure étudiée

III.12 Résultats et interprétations :

III.12.1 Effet de la géométrie de la fissure :

III.12.1.1 Effet de l'angle d'ouverture de la fissure :

La géométrie de la fissure joue un rôle important dans le mécanisme de rupture des pipes ou les normes internationaux (ASME, DNV, AFNOR) donne une importance majeure, dans cette partie de l'étude on va viser les modes de rupture des fissures par rapport au cas étudié. La figure (III.9) présente la variation des facteurs d'intensité de contrainte en mode I, en fonction de l'angle d'ouverture du front de fissure pour une pipe fissurée non réparé pour ($a=c/t=20\%$), On remarque que le comportement des FIC est non linéaire et qu'il décroît juste après l'angle de 55° , les valeurs maximales sont enregistrées pour le faible angle de fissure ($20^\circ-35^\circ$) ou il y a de forte concentration de contraintes. La plage de ($35-55$) présente la chute des valeurs du FIC K_I pour les points externes et internes.

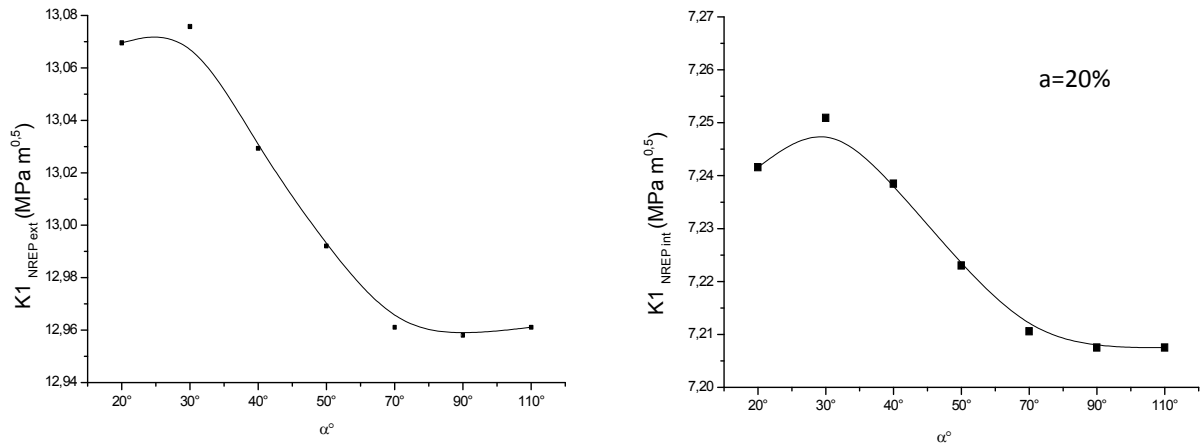


Figure (III.9) : variation du facteur d'intensité de contrainte K_I (FIC) en fonction de l'angle d'ouverture de la fissure pour une pipe non réparée ($a=20\%$)

La figure (III.10) présente la variation de du FIC K_I en fonction en fonction de l'angle d'ouverture de la fissure pour un pipe réparé (externe et interne), on remarque le FIC K_I change son comportement pour les fissures réparées. Il est proportionnel avec l'augmentation de l'angle de la fissure est touche ces maximums vers l'angle 50°, au-delà de cette angle le FIC est indépendant de l'ouverture de la fissure. Analysant le taux de réduction du FIC K_I , le point externe passe de 13.07 à 4.02 MPa m^{0.5} soit une réduction de 69% et le point interne passe de 7.25 à 3.68 MPa m^{0.5} soit une réduction de 49%.

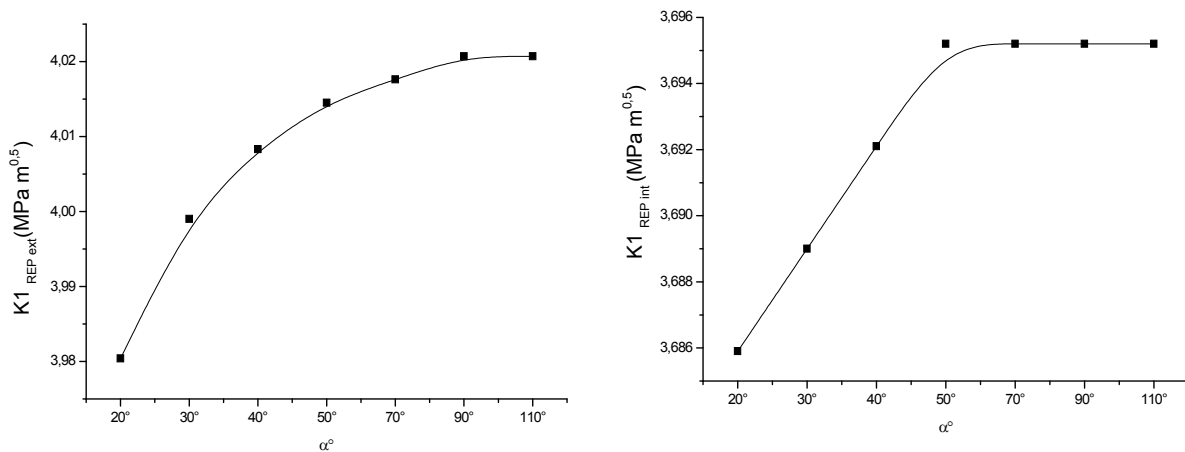


Figure (III.10) : variation du facteur d'intensité de contrainte K_I (FIC) en fonction de l'angle d'ouverture de la fissure pour une pipe réparée ($a=20\%$)

L'efficacité de la réparation est exposée sur la figure (III.11), un facteur de proportionnalité est exprimé par la relation (1) :

$$X = \frac{K_{I\ non\ rep} \ K_{I\ rep}}{K_{I\ non\ rep}}$$

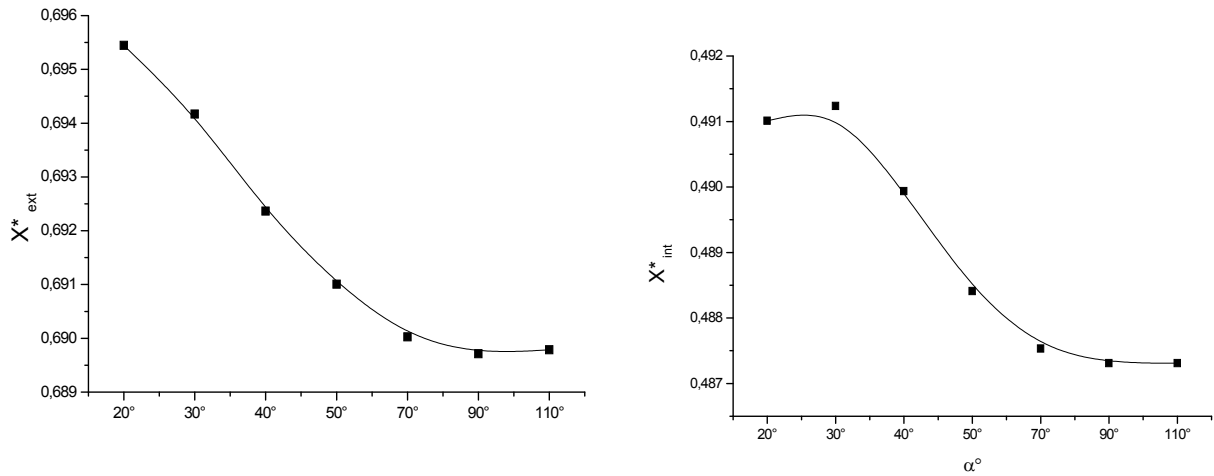


Figure (III.11) : variation de l'efficacité de la réparation X^* en fonction de l'angle α° ($a=20\%$)

On constate que la moyenne de l'efficacité est de 70% pour le point externe et de 50% pour le point interne, ceci est dû principalement au contact directe entre point extérieur avec le composite qui absorbe les contraintes transférées par la colle en pointe de la fissure.

La figure (III.12) présente la variation FIC K_I en mode I, en fonction de l'angle d'ouverture α pour une pipe fissurée non réparé pour ($a=30\%$). Le même comportement est remarqué pour le cas ou $a=20\%$.

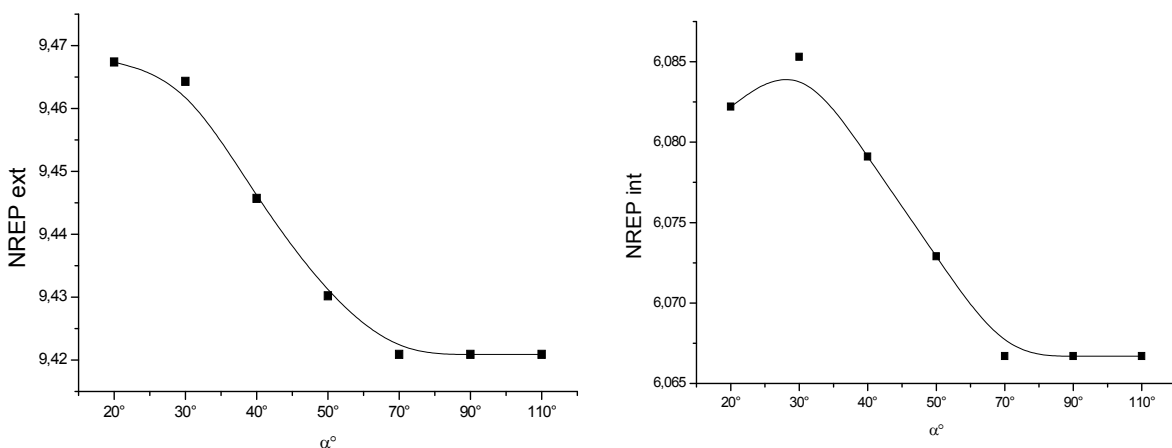


Figure (III.12) : variation du facteur d'intensité de contrainte K_I (FIC) en fonction de l'angle d'ouverture de la fissure pour une pipe non réparée ($a=30\%$)

Alors que le comportement des FIC K_I pour la pipe réparée change de comportement par rapport au cas où $a=20\%$, en effet sur la figure (III.13) on voit que le FIC K_I est faible et stable pour $20^\circ < \alpha < 35^\circ$, après K_I augmente entre $35^\circ < \alpha < 70^\circ$ à partir de l'angle 70° le FIC reste constant et indépendant de l'angle d'ouverture de la fissure.

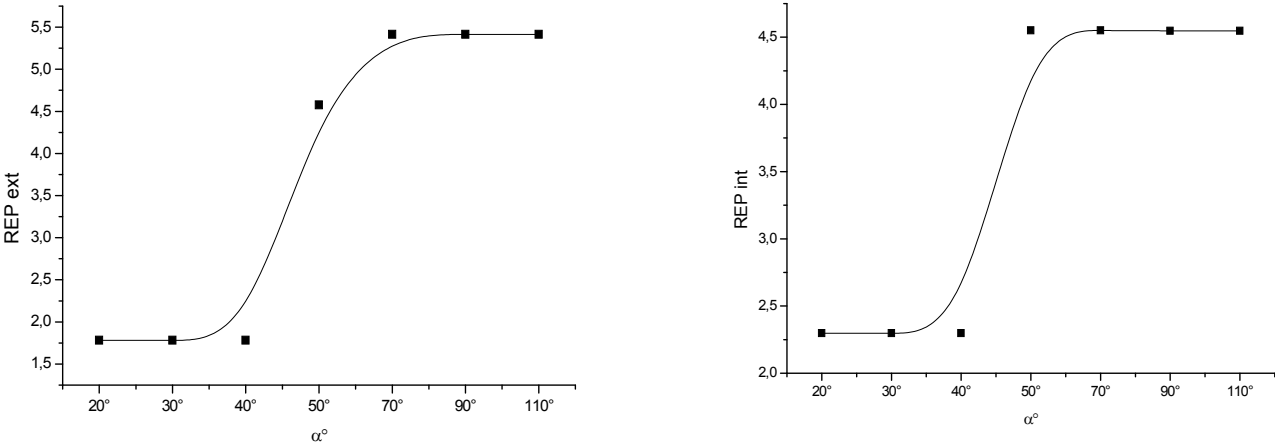


Figure (III.13) : variation du facteur d'intensité de contrainte K_I (FIC) en fonction de l'angle d'ouverture de la fissure pour une pipe réparée ($a=30\%$)

La figure (III.14) expose la variation de l'efficacité de la réparation X^* en fonction de l'angle α° pour une profondeur $a=30\%$. Différemment au comportement de l'efficacité pour le cas précédant $a=20\text{mm}$ l'efficacité X^* est très sensible à l'ouverture de la fissure $\square\square\square\square$ car elle varie entre 24% à 63% pour la position interne, cette efficacité est maximale pour des faibles angles α° de 20° à 45° .

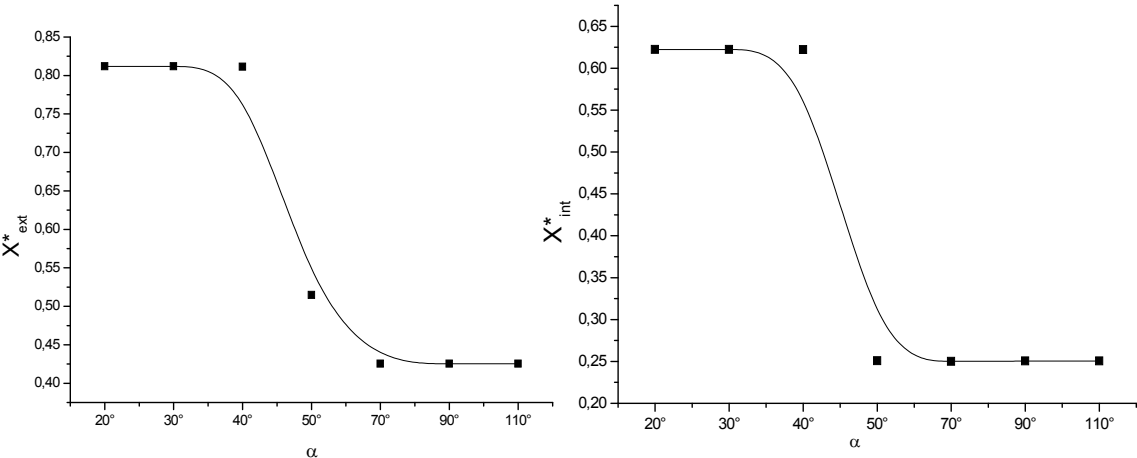


Figure (III.14) : variation de l'efficacité de la réparation X^* en fonction de l'angle α° ($a=30\text{mm}$)

Pour la position externe l'efficacité passe de 43% ($70^\circ < \alpha < 110^\circ$) à 81% ($20^\circ < \alpha < 40^\circ$), cette efficacité décroît pour des valeurs α entre 40° et 70° , la profondeur $a= 30\%$ présente un risque majeur de rupture pour le pipeline a des ouvertures de fissure dépassant les 40° .

D'autres analyses sont réalisées pour des profondeurs de la fissure $a= 50,70$ et 80% en fonction de l'ouverture de la fissure Figure (III.15).

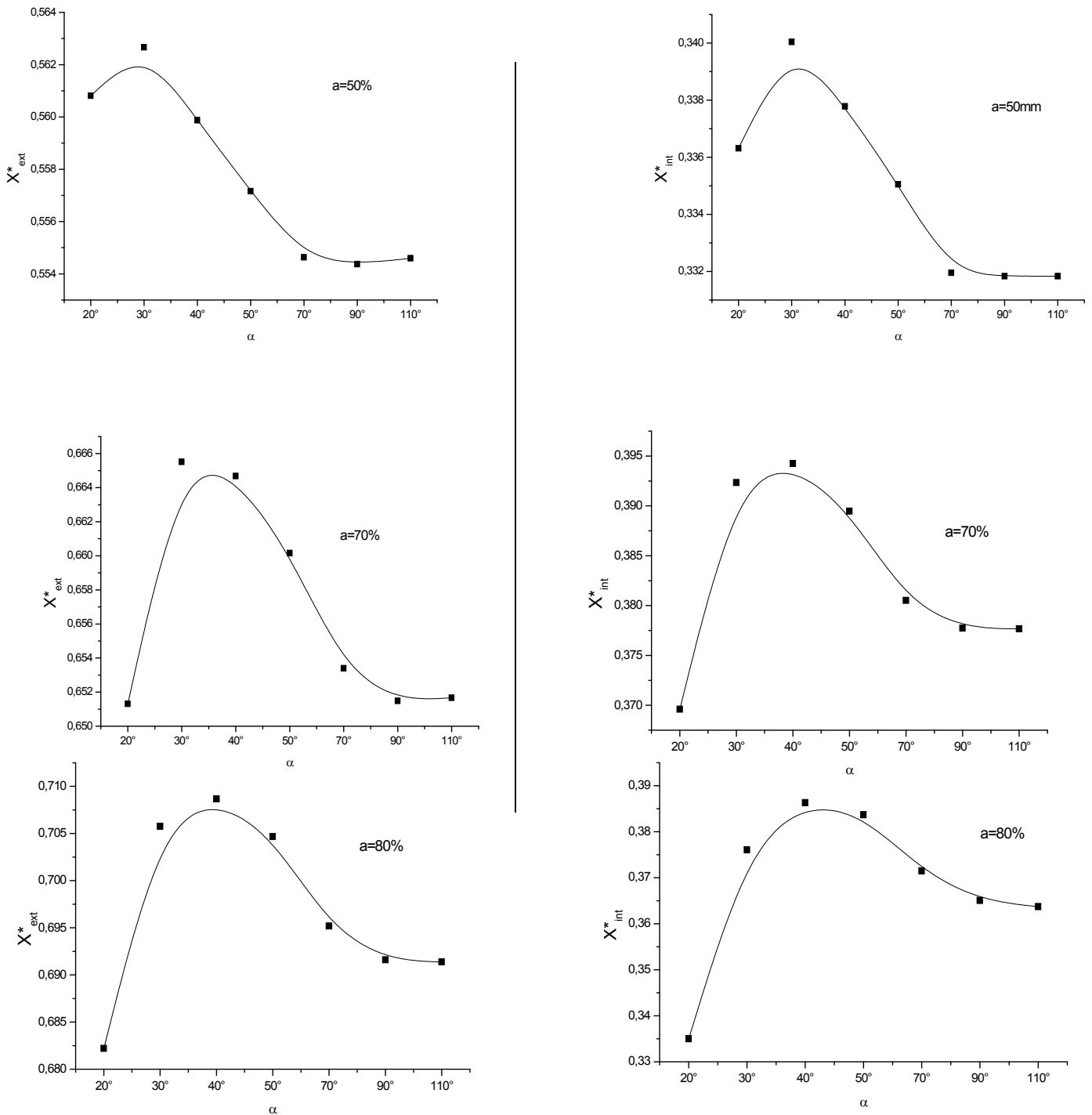


Figure (III.15) : variation de l'efficacité de la réparation X^* en fonction de l'angle α°

De la figure on peut voir clairement que l'efficacité présente pratiquement le même comportement pour les trois avancements de la fissure avec une intensité différente pour les deux positions du front de fissure étudié. Pour visualiser la différence on a tracé la figure (III.16) qui présente la variation de l'efficacité en fonction des profondeurs de la fissure.

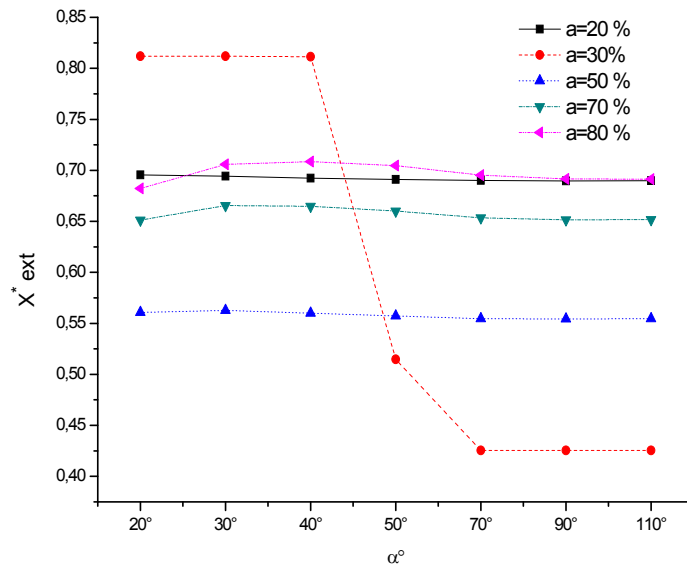


Figure (III.16) : variation de l'efficacité en fonction des profondeurs de la fissure.

On remarque que la profondeur $a = 30\%$ présente une particularité pour ce comportement, cependant l'efficacité est fortement influencée par la profondeur de la fissure que par l'ouverture et pour mieux voir l'évolution de cette efficacité on a tracé X^* en fonction des profondeurs (a) et seulement pour $\alpha = 20^\circ$ et 90° figure (III.17).

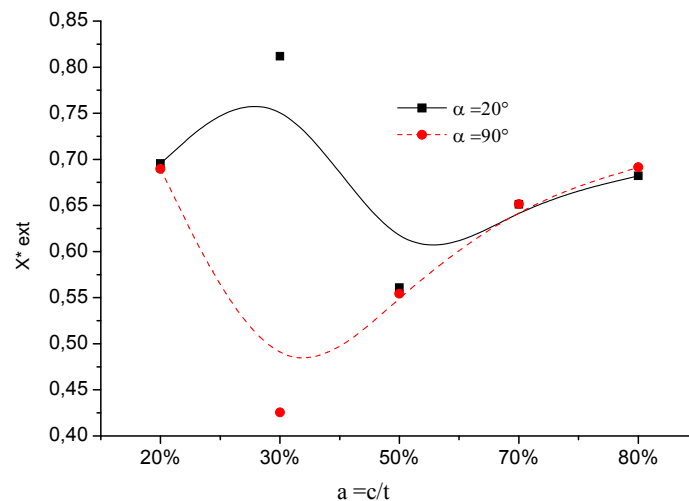


Figure (III.17) : variation de l'efficacité X^*_{ext} en fonction des profondeurs (a) et seulement pour $\alpha = 20^\circ$ et 90°

Effectivement la profondeur $a=30\%$ est inhérente et dangereuse car l'efficacité est affaiblie de 82% à 45%, alors qu'au-delà de 30% le système de réparation reprend son efficacité.

III.13 Effet de l'épaisseur de la colle :

La figure (III.18) dévoile l'effet de la variation de l'épaisseur sur l'acte de la réparation sur un pipeline réparé. On peut constater que les deux FIC externe et interne sont indépendants de l'épaisseur de la colle pour des valeurs qui dépassent $e_{\text{colle}} = 0.2\text{mm}$ puisque la colle joue le rôle de d'un pont de transfert de charge entre le pipeline et le composite. Aussi l'efficacité de la réparation est meilleure pour le FIC externe que pour le FIC interne ceci est dû à l'effet de du contacte directe entre le patche et le pipe.

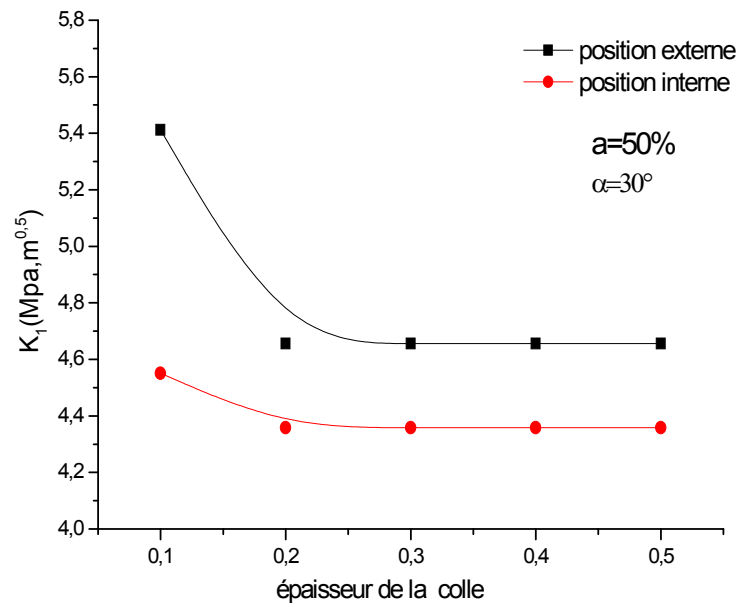


Figure (III.18) : variation du FIC K_I en fonction de l'épaisseur de la colle ($a=50\%$, $\alpha=30^\circ$)

Conclusion :

Les résultats obtenus numériquement par la méthode des éléments finis tridimensionnelle nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. Le FIC K_I est proportionnel avec l'augmentation de l'angle de la fissure est touche ces maximums vers l'angle 50° au-delà de cette angle le FIC est indépendant de l'ouverture de la fissure pour $a=20\%$.
2. La moyenne de l'efficacité est de 70% pour le point externe et de 50% pour le point interne, ceci est dû principalement au contact directe entre point extérieur avec le composite qui absorbe les contraintes transférées par la colle en pointe de la fissure.
3. Le FIC K_I est faible et stable pour $20^\circ < \alpha < 35^\circ$, après K_I augmente entre $35^\circ < \alpha < 70^\circ$ à partir de l'angle 70° le FIC reste constant et indépendant de l'angle d'ouverture de la fissure.
4. L'efficacité X^* est très sensible à l'ouverture de la fissure α° car elle varie entre 24% à 63% pour la position interne, cette efficacité est maximale pour des faibles angles α° de 20° à 45° ($a=30\%$).
5. L'efficacité présente pratiquement le même comportement pour les trois avancements de la fissure avec une intensité différente pour les deux positions du front de fissure étudié $a= 50,70$ et 80% .
6. La réduction de l'intensité de contrainte par le patch nous conduit à conclure que la durée de vie en fatigue peut être améliorée par l'utilisation d'un composite.
7. L'efficacité de la réparation X^* est fortement influencée par la profondeur de la fissure que par l'ouverture.
8. les deux FIC externe et interne sont indépendant de l'épaisseur de la colle pour des valeurs qui dépasse $e_{colle}= 0.2\text{mm}$ puisque la colle joue le rôle de d'un pont de transfert de charge entre le pipeline et le composite.

Références bibliographiques

- [1] A. BOUZIANE. " contribution à la détermination des critères des qualités des tubes soudés soumis à une pression intérieure". Thèse de magistère en génie mécanique, Université M^r HAMED BOUGARA BOUMERDES. Année universitaire 2007/2008.
- [2] Fateh AGGOUNE. Thèse de Magister en Génie Mécanique option : « Mécanique Appliquée en Engineering » : Evaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation 2010
- [3] RAMDANI Mohamed. Etude mécano fiabiliste sur le comportement en corrosion localisé des aciers API-5L X60 pour pipeline : modèle basé sur la ténacité. Thèse de magister en génie mécanique option : Science des matériaux. Université ABOU BEKR BELKAID Tlemcen 2008.
- [4] MERCHERNENE ABDERRAHIM, Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines, mémoire de master, Université ABOU BELKAID- TLEMEN, octobre 2013.
- [5] GHOMRIA, HASSAINE.A, Etudes des effets de surcharge sur la propagation de fissure de fatigue. Thèse d'ingénieur en GM, Université ABBT 2010/2011.
- [6] BELLAHCENE TASSADIT." Etude de la nocivité des défauts dans les canalisations sous environnement hydrogène". Thèse de doctorat de génie mécanique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou 2008.
- [7] MICHAELF. ASHABY. Choix des matériaux en conception mécanique. DUNOD 1997.
- [8] A. ALHUSSEIN. Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux « Transport et stockage des dérivés pétroliers, problématique d'endommagement des pipes par érosion de sable et par hydrogène » Université de Metz, 2010.
- [9] FEKIH," Etude bibliographique sur les défaillances des structures de pipelines et réparation par renforcement par manchons composites", mémoire de Master en génie mécanique, Université de Annaba, 2013.
- [10] CHEMANI. Y, Etude sur les Procédés de Traitement des tubes de Pipelines Corrodés Aciers API 5L X60, 2013. Mémoire master, Université de Tlemcen.
- [11] Mustapha ALLOUTI, " Etude de la nocivité des défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaison", Thèse de doctorat de spécialité Sciences de l'ingénieur, option Mécanique des matériaux, Université Paul Verlaine de Metz, juillet 2010
- [12] DJEDID Ibrahim, " Etude sur les défaillances des aciers API-5L X60 pour Pipeline cas de la ligne GZ1", mémoire de master, Université de Tlemcen, juin 2013
- [13] Marie- Pierre FOULC, José ALCORTA DURABILITE DES ASSEMBLAGES PAR COLLES : ETAT DE L'ART. (Module Ma5), 2008

[14] Tahar NATECHE, " Réhabilitation et Renforcement des canalisations sous pression en présence des défauts de surfaces", Thèse d'ingénieur, Magister en Génie Mécanique pour l'obtention du grade de docteur en science, Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf (Oran)

[15] Chunming Wang, Xingfang. Jie lie. Transmission electronmicroscopy of martensite, austenite, is lands in pipeline steel X70, Materials science and engineering. (2006)

[18] J. MDRAY. And Poutremoli Métallurgical options for API grade X70 and X80 linepipe. In international conference pipe technology. (1987)

[19] Ahmed BENHAMOUDA, étude du comportement des fissures dans les tubes sous pression interne. Thèse de magistère en génie mécanique option : Mécanique des surfaces et Matériaux. Université MENTOURI Constantine, 2010.

[20] PRASSE .T .MICHEL F, MOOK. G, schulte. K, BAUHOFER. W. : A comparative investigation of electrical resistance acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates. Composites science and technology, 2000

[21] SOUTIS. C. SMITH. F. C , MATTHEWEUS. K. L. : predicting the compressive engineering performance of carbon fiber reinforced plastics composites. Composites part A : Applied science and manufacturing (Incorporating composites and composites Manufacturing), 1999, Vol 31, PP 531-536

[22] [http:// www.csiro.au/ Organisation- structure/ Divisions/ Earth- science- Ressource- Engineering/ PEPE ASSURE. Aspx](http://www.csiro.au/Organisation-structure/Divisions/Earth-science-Resource-Engineering/PEPE_ASSURE.aspx)

[23] J. Vincent- GENOD. Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation. Institut français du pétrole. Société des éditions techniques de Paris. (1989)

[24] [http:// www.clockspring.com/wp-content/uploads/2011/12/brochure 1. Pdf](http://www.clockspring.com/wp-content/uploads/2011/12/brochure_1.Pdf)

[25] Seyed Mohammad SEYEDI « FORMATION, PROPAGATION ET COALESCENCE DANS UN RESEAU DE FISSURES EN FATIGUE THERMIQUE » Thèse de doctorat, 16 février 2004.

[26] S. ben Soltane, étude électrochimique de la corrosion des aciers API 5L X60 pour gazoduc en milieu environnant de sol et protection par inhibiteur à base de poly phosphates, mémoire de magister, Université USTO MB Oran, Avril 2009.

[27] H.M. Westergaad, Bearing Pressures and cracks Trans ASME, Journal, Appl, Mech, 1939.

[28] G.R. Irwin, Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate, journal of Applied Mechanics, Vol, 24, 1957, pp, 361-364.

[29] Baker, A.,and Jones, R. Bonded repair of aircraft structures. MartinusNijhoff Publishers, 1988.

[30] ABAQUS standard User's manuel, Karlsson& Sorensen, 2005