

Chapitre I : Étude sur les pipelines et leur défaillance

I. Introduction

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des biens, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol. Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés, en zone de risque sismique ou politiquement instable. Au contraire de leur investissement initial ; leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances.[1]



Figure I.1 : acheminement d'un pipeline

Il existe trois grandes familles des tubes :

- 1- Les petits tubes soudés dont le diamètre ne dépasse pas 219mm.
- 2- Les moyens tubes soudés dont le diamètre est compris entre 228.6mm et 406.4mm.
- 3- Les gros tubes soudés dont le diamètre est supérieur à 406.4mm. [1]

I.2. Caractéristiques des tubes

La plupart des pipelines sont faits d'acier, bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les pipelines d'acier est fabriqué en soudant de courtes sections de tuyaux (20 m) les uns aux autres. Après la radioscopie de l'assemblage, le tuyau est ensuite enveloppé d'une couche protectrice avant d'être enterré. Tous les pipelines, sans exception, font l'objet d'une inspection en plus d'être soumis à une épreuve de pression avant leur utilisation.

Ces caractéristiques principales (diamètres, épaisseur, type d'acier, spécifications de construction, température et pression d'exploitation...) sont régies par tout un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et de compromis économiques.

Le diamètre d'une canalisation est déterminé en fonction du débit des produits à acheminer, de leur viscosité et de leur densité, 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.

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

Chapitre I : Étude sur les pipelines et leur défaillance

pression de service ou des conditions de pose lesquelles parfois imposent des caractéristiques dimensionnelles plus sévères.

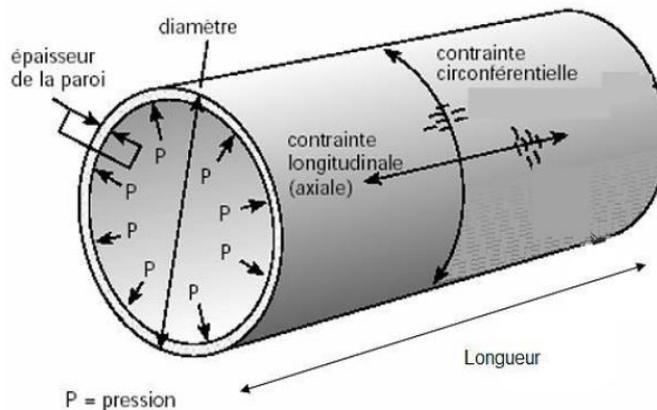


Figure I.2 : Caractéristiques des tubes.

1.3. Les aciers pour pipelines

1.3.1 Caractérisation et propriétés

L'une des exigences du cahier des charges que doit remplir l'acier pour gazoducs est la réconciliation des propriétés d'emploi ; une limite d'élasticité maximale, une bonne ténacité, ainsi qu'une bonne soudabilité, une bonne résistance à la corrosion et un faible coût de revient. Pour répondre à ces exigences la classe des aciers dits (HSLA) (Haigh Strength Low Alloy Steels) a été développée au fil des quarante dernières années. 95% des aciers utilisés pour gazoducs sont des aciers micro-alliés à haute résistance (HSLA). [1]

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 Young 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.

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'autre part, 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. [2].

Le tableau suivant (Tab .I.1) signifie les caractéristiques mécaniques de l'acier type API 5L, qui est utilisé beaucoup dans l'industrie de tube de pipeline, on remarque les valeurs de la résistance rupture et la limite élastique d'acier, cela est dû aux résultats des essais expérimentaux. Les caractéristiques mécaniques obtenues sont les suivantes :

API5L-PSL1	A	B	X42	X52	X56	X60	X70
Résistance à Rupture (N/mm ²)	340	420	420	470	520	517	672

Tableau I.1. Caractéristique mécanique par (N/mm²) (Tubes de conduite PSL 1) [3].

Chapitre I : Étude sur les pipelines et leur défaillance

Module d'Young E (mPa)	Limite d'élasticité Re (mPa)	Résistance ultime Rm (mPa)
200 000	448	600
Distribution	Normal	Normal

Tableau I.2. Caractéristique mécanique de l'acier X65 selon la norme API [3].

1.4. Fabrication de tubes

La multiplicité des diamètres et des épaisseurs de tubes et le développement avec le temps de leurs techniques de fabrication [4], constituent les raisons de la diversité du réseau de transport gazier algérien. On retrouve :

- les tubes soudés sous la forme en spirale.
- Les tubes soudés sous forme longitudinale.
- Les tubes formés sans soudure.

I.4.1. Les tubes soudés sous forme spirale

Les procédures de fabrication des tubes soudés en spirale sont faites par cintrage de bande de feuilles 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.7. Le soudage se produit ici sur la production de tubes en spirale qui sont généralement fournis. [5].

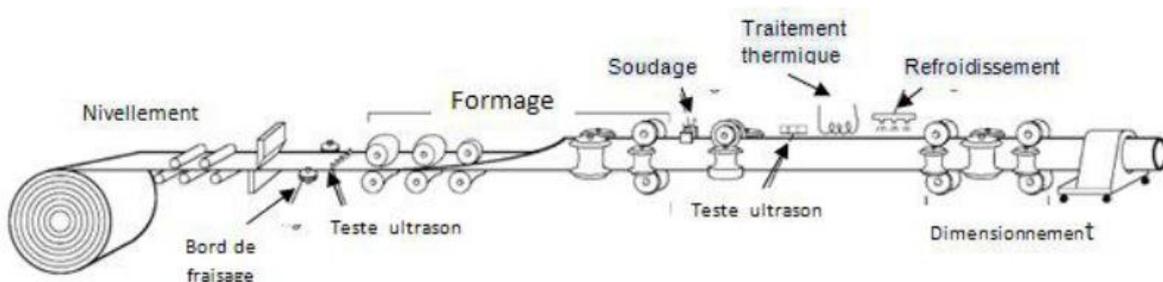


Figure I.3 : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale. [5].

Le formage du tube en spirale se fait avec inclinaison de l'angle d'introduction de la bande, Pratiquement, c'est très difficile de fabriquer les tubes avec un petit angle aigu, pour cela, que les valeurs de l'angle se limitent entre 15° et 50° .

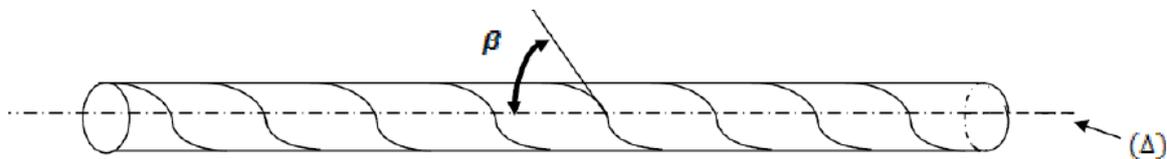


Figure I.4 : L'angle d'introduction de la bande [5].

I.4.2. Les tubes soudés sous forme longitudinale

Les tubes de grand diamètre soudés longitudinalement sont fabriqués selon le procédé "UOE", désignation qui reprend la variation de forme au cours de la fabrication ; le croquage, la forme

Chapitre I : Étude sur les pipelines et leur défaillance

« U », la forme « O » et enfin l'expansion. elle est spécifique aux tubes avec des diamètres plus que 406.4 mm Cette technique passe par trois étapes de formage :

- Le formage où la plaque va être pliée aux niveaux de l'extrémité, l'objectif de cette opération est de faciliter le processus de pliage par les étapes suivante, à partir de ça la tôle ou la plaque unitaire est pliée en deux types de presse la première confère la plaque sous forme "U" et la seconde lui donne une forme "O"
- Le soudage qui dépend 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,
- L'Expansion et calibrage pour but d'obtenir des tubes de section parfaitement circulaire, les tubes après être soudés sont soumis à une expansion mécanique ou hydraulique qui leur fait subir une augmentation de diamètre de 1 à 1.5 % [6]

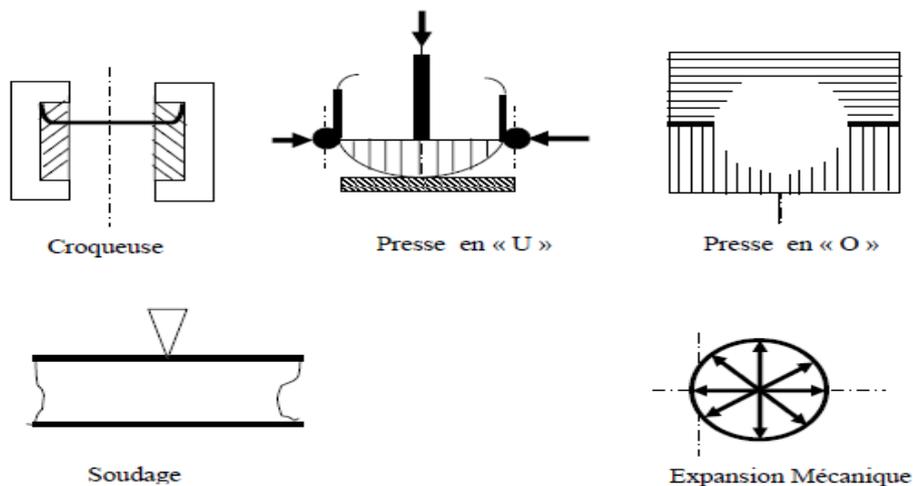


Figure I.5 : mise en forme des tubes par le procédé –UOE-[6]

I.4.3. Les tube sans soudure

Les tubes formés sans soudure, sont généralement de petits diamètres et de longueur moins de 450 mm, les méthodes principales de fabrication de ce type de tube comportent, le métal est contenu entre la filière et l'aiguille. On obtient un tube monobloc sans soudure. Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe. [7]

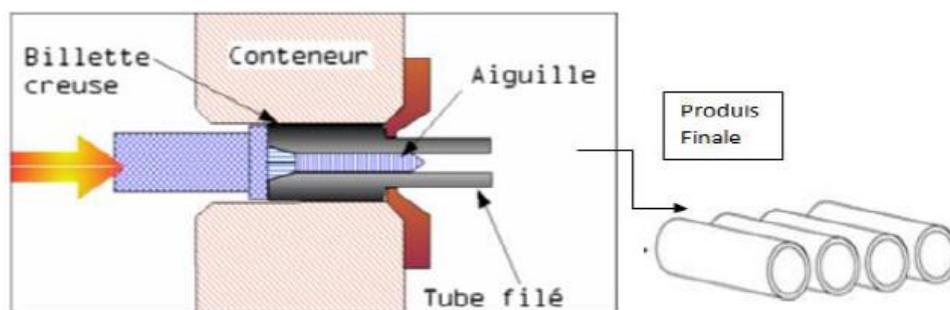


Figure I.6 : fabrication de pipe sans soudure. [7]

Chapitre I : Étude sur les pipelines et leur défaillance

I.5 Revêtement des tubes

On utilise généralement la technique classique des trois couches et de Fusion-Bonded Epoxy (FBE) pour l'isolation extérieure. La polyoléfine est souvent utilisée aussi bien que du polyéthylène (PE) et du polypropylène (PP). L'objectif principal est de protéger le tube par le revêtement contre le processus de la corrosion interne et externe.

I.6. Défaillances des tubes

Parmi les paramètres influant le comportement en fatigue des pipelines et des structures, on trouve trois grandes catégories représenté dans l'organigramme suivant (figure I-7).

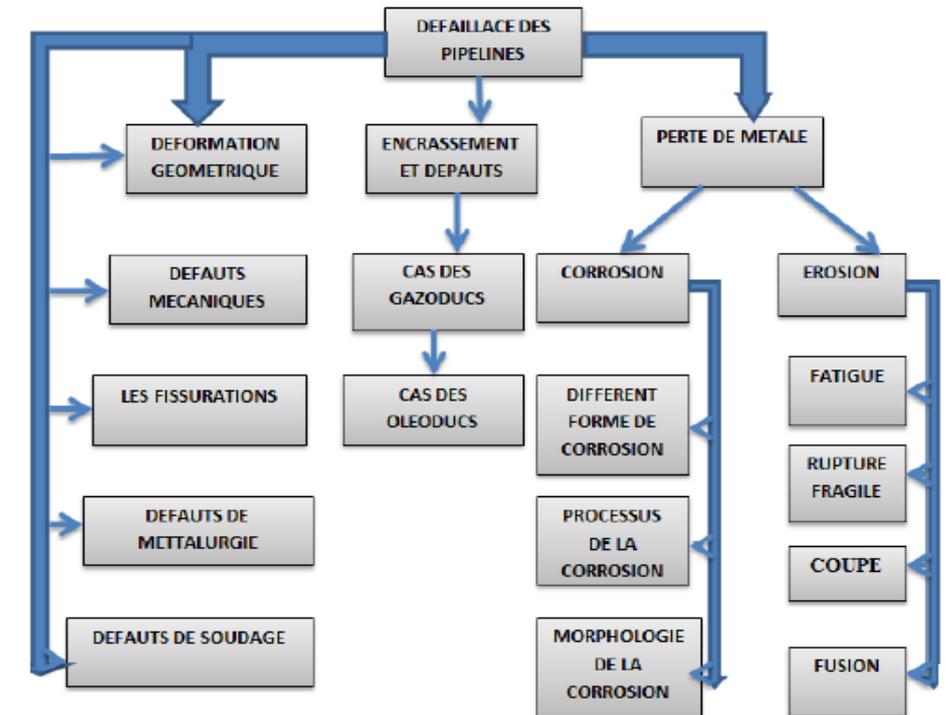


Figure I.7 : Organigramme présente les grandes catégories d'endommagement[7]

Les causes des défaillances des tubes ou tuyaux sous pression sont de diverses natures, elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite « fissure ». La plupart de ces défaillances sont causées par des piqûres de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contrainte, mais il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage. Les mouvements de terrain (glissements du sol, tremblement de terre,...) peuvent aussi être la cause de dommage sur tubes enterrés. Les exploitants des tubes étudient ces problèmes depuis longtemps et possèdent une bonne connaissance des méthodes permettant de les gérer. [7]

I.7. Différents types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations

Les canalisations sont largement employées pour le transport de fluides et de gaz car c'est le mode d'acheminement actuellement le plus économique. L'accroissement de leur diamètre et de la pression de service augmentent le risque de rupture amorcée à partir de défauts. La présence d'un défaut dans une canalisation associée à l'effet de la pression interne pourra provoquer une rupture localisée induisant une fuite et éventuellement une explosion.

Généralement, pour les canalisations, on distingue les défauts suivants: les cratères de corrosion, les fissures, les enfoncements, les éraflures et le défaut dit combiner (enfoncement

Chapitre I : Étude sur les pipelines et leur défaillance

+éraflures), des problèmes liés aux défauts de soudage. Les mouvements de terrain (glissement du sol, tremblement de terre,...) peuvent aussi être la cause de dommage sur les gazoducs enterrés.

I.7. 1. Fissure

Les canalisations sont le plus souvent assemblées sur chantier à partir de la jonction de tubes d'acier soudés bout à bout. Les soudures longitudinales réalisées lors du formage du tube en usine sont contrôlés avant que le transport du tubes ne soit sur chantier. Par contre, les soudures réalisées sur chantier peuvent présenter des fissures car elles sont parfois réalisées dans des conditions difficiles.

Les défauts rencontrés dans les joints soudés sont généralement assimilés à des fissures, comme celles résultant d'un manque de pénétration de la matière

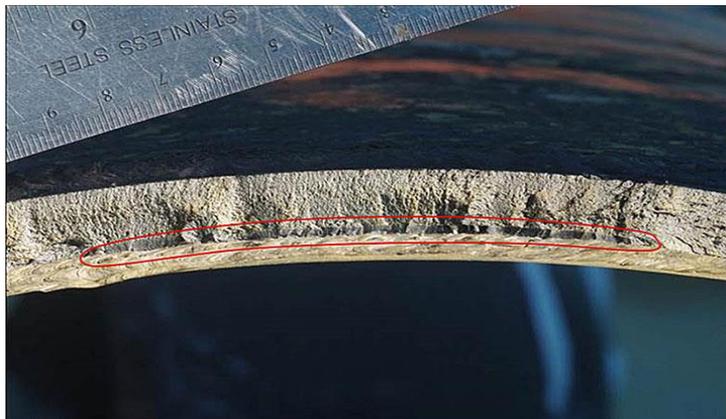


Figure I.8 : Fissure préexistante dans le joint circulaire

I.7. 2. Critère de la corrosion

La corrosion des pipelines de pétrole et de gaz 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.



Figure I.9 : Corrosion dans la pipe.

I.7.3 Éraflure

Une éraflure est un endommagement superficiel de la surface dû à un contact avec un objet étranger qui provoque un enlèvement de matière. Les dimensions d'une éraflure sont définies de façon que la longueur soit plus grande que la largeur. [8]

I.7.4 Enfoncement

Chapitre I : Étude sur les pipelines et leur défaillance

Un enfoncement dans un pipeline est une déformation plastique permanente de la section circulaire de la paroi du tube dû à un impact avec un corps étranger. 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 du tuyau par rapport à son diamètre initial. [9]

I.7.5 Endommagement combiné (éraflure+ enfoncement)

Ce type d'endommagement est très dangereux car il résulte de la concentration des contraintes provoquée par l'agression externe (enfoncement) et la réduction de l'épaisseur du pipeline (éraflure) qui engendrent une diminution locale de la résistance mécanique.

I.8.Détection des défaillances

La détection des défaillances se fait par le contrôle non destructif ou encore le CND qui 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. L'opération de contrôle non destructif d'un objet ne se borne généralement pas à la détection d'éventuels défauts. En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectuée au préalable, il faut envisager toute une procédure ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, présentation visuelle, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen. Parmi les méthodes de CND on cite :

I.8.1.Détection des défauts par contrôle visuel

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

I.8.2. La radiographie

L'examen de la structure ou de la santé interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou γ) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié,[10]

I.8.3. Contrôle par ultrasons

Leur principe de fonctionnement est assez simple. Un transducteur émet des pulsations ultrasoniques. En rencontrant la surface intérieure un premier écho se produit. Un deuxième écho se produit lorsque la pulsation atteint la face extérieure de la conduite. La vitesse de propagation de l'onde ultrasonique étant connue, le temps séparant la perception des deux échos donne l'épaisseur exacte de la conduite.

Cependant cette technique ne peut être utilisée qu'en présence d'un couplant liquide. De plus, le transducteur (l'émetteur d'ultrasons) doit être placé à une distance constante de la paroi avec une inclinaison bien définie. Ce qui pose un problème au niveau des courbures de conduite. Le non-respect de ces exigences peut entraîner des erreurs de lecture et donc d'interprétation.[11]

Chapitre I : Étude sur les pipelines et leur défaillance



Figure I.10 : détection de défaut par le contrôle par ultrasons

I.8.4. 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 mais il y'a des cas où on ne peut pas utiliser l'outil intelligent. Cette technique utilise de puissants aimants induisant un flux magnétique dans la paroi 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.[12]



Figure I.11 : Piston instrumenté basé sur le principe de perte de flux magnétique

I.9. Traitements de réparation

Les prétraitements de surfaces ont pour but d'éliminer les couches superficielles peu adhérentes et d'améliorer le mouillage du substrat par la colle, ainsi d'augmenter la rugosité du substrat pour favoriser l'accrochage de l'adhésif. C'est pourquoi il est nécessaire dans la plupart des cas de recourir à des traitements de surface (mécanique, chimique, etc.) du substrat pour améliorer la qualité du collage. De nombreuses méthodes de préparation de surface sont disponibles (traitements chimiques, mécaniques, etc.).[13]

I.10. Méthodes de réparations (réhabilitations) des pipelines

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

- La géométrie de la canalisation (Diamètre ; cintrage ...)
- La nuance de l'acier de fabrication de l'acier.
- La localisation de la canalisation.
- Des conditions d'exploitation.

Chapitre I : Étude sur les pipelines et leur défaillance

- La localisation du défaut.
- La nature et dimension du défaut.

I.10. 1 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 I.12 : Réparation de surface pour réfection enrobage.

I.10. 2. Coupe et remplacement après vidange et inertage

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

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



Figure I.13 : Changement du tronçon endommagé d'une canalisation, (a).découpage, (b).ré-soudage.

I.11.conclusion

Le système de transport des hydrocarbures par pipeline est un système en évolution à travers le monde en recherchant les solutions appropriées pour un transport fiable.

Dans ce chapitre on a présenté dans la première partie une définition et une vue générale sur la technologie des pipelines. Puis on a parlé sur les propriétés qui caractérisant les aciers les plus utilisés et on a cité les différents procédés de fabrication des tubes pour le transport des hydrocarbures. Dans la deuxième partie on a effectué une recherche sur les principales causes de défaillance des pipelines tels que les fissures, la corrosion, les éraflures et les enfoncements finalement on a cité les différentes méthodes de réparation des pipelines.

II.1 Introduction

Les composites donnent des concurrences aux métaux parce qu'ils sont légers, inaltérables et que leur résistance dépasse celle de l'acier (leur rapport résistance/poids est très élevé). Depuis une dizaine d'années, ils sont présents dans le secteur de la construction, en particulier pour des interventions de renforcement d'ouvrages.

Les matériaux composites sont nés de l'association de matériaux aux caractéristiques complémentaires, pour conférer à cet assemblage des propriétés originales. Cependant, les matériaux composites ne sont utilisés de manière systématique que lorsque les matériaux traditionnels ne peuvent plus répondre aux exigences d'utilisation, leurs intérêt par rapport aux métaux se situ dans le fait qu'ils a priori non corrodables.[14]

II.2. Matériaux Composites

Les matériaux composites (polymère renforcé de fibres : PRF), (fiber reinforced plastics - FRP) ou composites améliorés sont des matériaux solides hétérogènes et anisotropes, constitués de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément

Dans un matériau composite on distingue généralement:

- Le renfort qui joue le rôle de squelette ou d'armature ; il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Souvent il est de nature filamentaire (fibre organique).
- La matrice qui lie les fibres (renfort), répartit les efforts (résistance à la compression ou à la flexion), assure aussi la protection chimique. Les matrices sont souvent des résines organiques thermoplastiques ou thermodurcissables.

Souvent il existe entre les deux constituants, un troisième élément, qui aura pour rôle de transmettre les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement d'où l'établissement d'une bonne adhérence. [13]

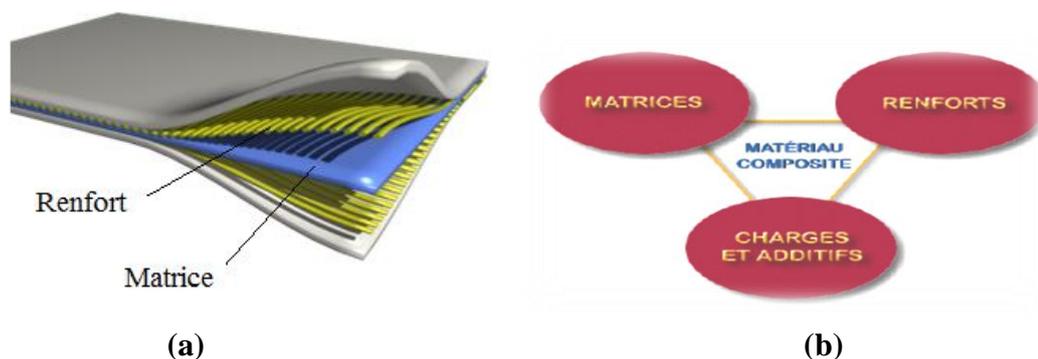


Figure II.1 : (a) Schéma de matériau composite (b) Assemblage d'un matériau composite[14]

II.3. Les Eléments Constituants d'un Matériau Composite

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes

phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques

II.3.1. Fibres de renforcement

Les fibres sont la charge primaire de la réalisation des composants de matériaux composites. L'orientation des fibres détermine la force et la rigidité directionnelle pour une application particulière. Les fibres de renforcement les plus couramment utilisés pour les composites sont le verre, carbone, aramide, le polyéthylène, le bore, le polyester, le nylon, des fibres naturelles, etc.

Dans l'industrie de réparation des pipelines, les fibres de verre, carbone et aramides sont les plus couramment utilisés vue leurs performances et leurs disponibilité sur le marché. . Le tableau II.1 présente récapitulatif sur les propriétés des fibres. [15].

Propriété	Verre			Carbone	Aramide
	Type E	Type S-2		T700 SC	K49
Densité.	Gm/cc	2.58	2.46	1.80	1.45
Résistance à la traction.	MPa	3445	4890	4900	3000
Module de traction.	GPa	72.3	86.9	230	112.4
Résistance à la compression.	MPa	1080	1600	1570	200
Contrainte à la rupture.	%	4.8	5.7	1.5	2.4
Point de ramollissement.	°C	846	1056	>350	>150
Avantages.	faible coût. facilement disponible. très compatible.			Faible densité, une haute résistance, rigidité, faible densité et une forte résistance à la fatigue.	Une forte performance d'impact. Difficilement inflammable. résistant aux produits chimiques.
Inconvénients.	faible module. sensibles à la fatigue, fluage et rupture.			Cout élevé, la disponibilité et la compatibilité.	Faible résistance à la compression. sensibles dans l'UV. Sensibles à l'humidité.

Tableau II.1 : Récapitulatif sur les propriétés des fibres. [15].

II.3.2. Les matrice

La matrice se compose d'une résine (polyester, époxy etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique l'ensemble résine-charges se comporte comme un

matériau homogène et le composite est constitué de ce matériau homogène (la matrice) et d'un renfort. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure II.2 [16].

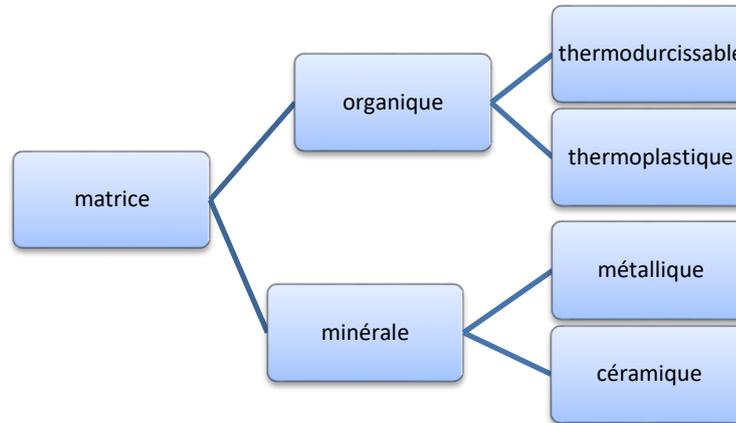


figure II.2 : Types de matrice [16]

II.3.2.1. Les résines (organiques) :

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur, les résines doivent donc être assez déformables et présentent une bonne compatibilité avec les fibres. Deux grandes familles de résines polymères existent: les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables.

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois.[16]

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température.

II.3.2.2. Les charges (minérales)

L'utilisation d'une couche d'interface permet d'assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice. Les fibres destinées à la fabrication des composites reçoivent un apprêt spécifique comportant un agent collant qui permet de coller les filaments pour en faire des fils et assure, en outre, une fonction de lubrification (pour le protéger contre l'abrasion due au frottement entre fibres) [17].

Il y a plusieurs types de charges parmi elles :

- les charges organiques qui sont des charges cellulosiques utilisées comme étant des charges de résines thermodurcissables. Ces avantages sont d'un coût peu élevé et d'une faible densité.
- les charges minérales qui sont les craies et les carbonates. Les craies sont à 99% de calcite, de la silice et d'autres minéraux, Les carbonates de calciums ou de magnésium sont utilisés comme des charges et aussi comme des retardateurs de flamme.

II.3.3. Remplissage « Infill »

Tous les systèmes de réparation de pipeline utilisent une couche de résine de mastic qui fournit un lit pour le manchon composite renforcé par des fibres qui est soit souple ou rigide.

Le mastic est utilisé pour combler les défauts sur le tube d'acier. L'application de remplissage ayant pour but de répartir les contraintes d'une façon homogènes et transférer la charge à partir d'acier au composite. Figure II.3 représente un processus de réparation extérieur d'une pipe utilisant remplissage et enveloppe souple.



Figure II.3 : processus de réparation extérieure d'une pipe utilisant remplissage et enveloppe souple

II.4. Domaines d'application :

Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien, maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et à leur faible masse volumique. Les premiers développements des composites ont été liés aux besoins des industries aéros spatiales. Le marché des matériaux composites est caractérisé par le pouvoir d'innovation. Par exemple il n'y a pas d'Airbus A380 sans composites. On peut aussi citer les progrès obtenus sur les skis, les raquettes de tennis, les coques des bateaux, les pneumatiques de l'isolation ou les emballages pour ne citer que ceux là. L'innovation tient aux performances mais plus encore à l'adaptabilité quasi parfaite du composite à la fonction requise. C'est un matériau conçu à la carte et en même temps que la structure fabriquée.[13]

II.5. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites

L'usage des matériaux composites ne cesse de croître dans différents domaines : automobile, naval, pétrolier, aéronautique et aérospatial. En effet, ces matériaux présentent de nombreux avantages :

- Importantes rigidités et résistances spécifiques afin de concevoir des structures hautes performances tout en réalisant des gains de masse par rapport aux solutions métalliques précédentes.
- Faible sensibilité à la fatigue.
- Faible sensibilité à la corrosion.
- Possibilité de réaliser des structures de formes complexes réduisant ainsi les coûts d'assemblages.

- Possibilité de dimensionner les structures avec des propriétés élevées uniquement dans les axes de chargement.
- Possibilité de fabriquer des matériaux avec des propriétés particulières [18].

Malgré que les composites sont plus avantageux que la plupart des matériaux, mais la perfection n'existe pas, quelques inconvénients peuvent surgir :

- Vieillesse sous l'action de l'eau et de la température.
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.
- Meilleure tenue au feu que les alliages légers mais l'émission de fumées peut être toxiques pour certaines matrices [19].

II.6. Systèmes de réparation par renforcement des fibres composites

Généralement, il existe deux types de systèmes de réparation: le Système de réparation par matériaux composites pré -durci «Pre-cured layered » et Système de réparation par matériaux composites flexible «Flexible wetlay-up system » qui sont appliqués dans la réparation des conduites défectueuses .Les deux méthodes de réparation entourent le tuyau par manchon de manière flexible ou par des connexions plus rigides. Les systèmes de réparation / réhabilitation des conduites peuvent être considérés dans quatre grandes catégories [20]. Ce sont:

- les systèmes qui empêchent la progression future de la corrosion,
- les réparations destinées à rétablir la résistance de la canalisation contenant un défaut de paroi partielle comme le gougeage,
- les réparations destinées à enfermer le fluide dans le boîtier
- les réparations qui rétabliront la résistance de la conduite et contiendront le fluide transporté en cas d'incident.

Ces exigences relatives à la réparation du pipeline doivent être prises en compte lors de la sélection du système de réparation composite approprié.

II.6.1. Système de réparation par matériaux composites flexible

Le système de réparation par matériaux composites flexible est intensivement utilisé par l'industrie de réparation de pipelines enterrés sous forme de suremballage des pipes d'acier même aux angles ou des courbures pour une vaste gamme d'applications de pression. Cette application utilise la matrice de résine qui est généralement à l'état non solidifiés. Leur solidification 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, aramide,...) 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 externes ou pour la progression future de la corrosion et de rétablir la résistance du pipeline contenant un défaut à la paroi. Cependant, le confinement de pression est l'une des lacunes du système. 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, l'application et le durcissement de la résine pour les systèmes flexibles, il est souvent souhaitable d'utiliser

un manchon spiral pré-durci. L'application de système d'emballage dans un espace confiné est très difficile.[15]

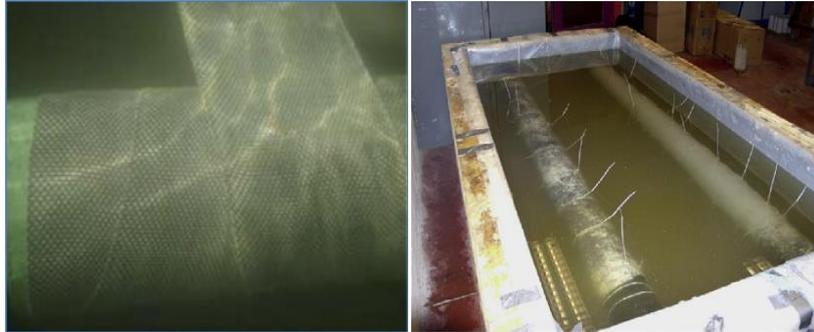


Figure II.4 : Spécimens en CFRP enveloppés durcis sous l'application sous-marine.[15]

II.6.2. Système de réparation par matériaux composites pré-durci

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.5 montre le système de réparation : Clock Spring qui est intensivement utilisé dans l'industrie de réparation des pipelines .le système Weld-Wrapest un autre exemple de système de réparation par matériaux composites pré-durci disponible dans le marché [21]. 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 scellées ensemble avec un agent de liaison solide. Le défaut est rempli avec du mastic adhésif pour aider à l'appui et le transfert de charge avant leur installation.

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 ces systèmes est généralement limitée 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 couches. Ainsi, la liaison des couches et leurs performances ainsi que l'installation sont les principaux inconvénients de ce système de réparation.[15]

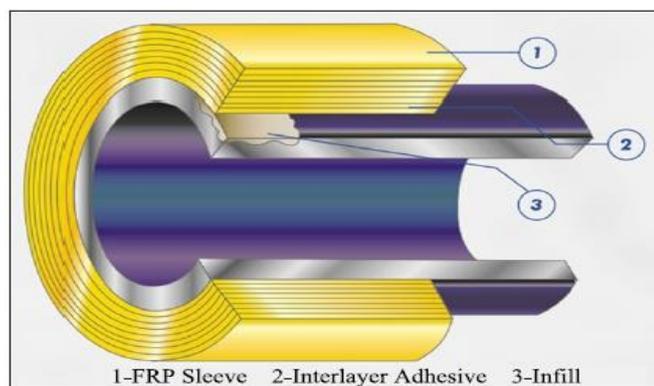


Figure II.5 : réparation par renforcement composite type ClockSpring.[15]

Chapitre II : Réparation Des Pipelines Par Matériaux Composites

La figure II.6 présente La phase d'installation de clock spring :[22]

1-Localisation du point de corrosion par GPS



2-Décapage de la conduite



3. Mesurage de la perte de métal



4. Phase de sablage



5. Phase installation du kit Clock spring



Figure II. 6 : installation de Clock Spring [22]

II.7. Conception de système de réparation en matériau composite

Les conditions des conceptions structurales fondamentales de la réparation en composite guidant effectivement l'architecture du matériau composite et les options géométriques sont énumérées comme :

- Prévenir le gonflement de la section corrodée du pipeline pendant la pressurisation.
- Assurer un renforcement suffisant de sorte que les moments de flexion et d'autres charges demeurent inférieurs aux valeurs permises.
- Maintenir une bonne adhérence entre les interfaces dans la zone de réparation.

D'autre part, les conditions secondaires pour faciliter l'installation, la viabilité économique, le contrôle de qualité aussi bien que l'intégrité structurale pendant l'installation, la résistance aux chocs et l'absence de la corrosion galvanique.[10]

La figure II.6 présente l'application d'une réparation par patch en composite sur un pipeline.



Figure II.6 : (a) Installation de la moitié de la coquille du composite en carbone, (b) Réparation finale en composite [10]

II.8. Conclusion

Depuis l'implantation des composites en réparation des structures métalliques et les pipes transportant des hydrocarbures, des efforts ont été menés afin de proposer des solutions de réparation adaptées à ces matériaux. Dans un premier temps, les seules solutions possibles pour les canalisations endommagées étaient de les remplacer par d'autres ou de leur souder une nouvelle section. Parmi toutes les réparations recensées, la réparation par collage d'un patch composite est aujourd'hui employée pour la résolution des problèmes industriels liés aux pipelines. Cette technique de réparation nous semble la plus prometteuse pour résoudre rapidement et à moindre coût les dommages de canalisation.

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

III.1.Introduction

La détermination des contraintes des canalisations est étudiée par plusieurs chercheurs du monde entier, avec la mise en œuvre des méthodes plus précises, toujours en cours d'évolution. Nous présentons dans cette première partie de ce chapitre quelque travaux de recherches élaborés dans ce contexte.

La deuxième partie de ce chapitre comprend une étude analytique pour le but de connaître les contraintes appliqué à une pipe puis en déterminant l'ensemble des équations de la pression ultime pour une pipe comportent un défaut de corrosion. Ainsi une présentation des différents codes d'évaluation des défauts les plus utilisés dans le domaine de réparation des pipelines tel que l'ASME B31 G et l'ASME B31 G modifié et l'ASME PCC-2 et le PDAM.

III.2. Recherche bibliographique

Le travail de Chinedu Ossai et al qui présente une technique d'inspection et de réparation des canalisations corrodées à l'intérieur. Des modèles de simulation été appliqués pour déterminer la croissance de la profondeur des défauts de corrosion, Les résultats obtenus montre que le modèle a des applications pratiques pour la réparation de pipelines corrodés à l'intérieur.[23]

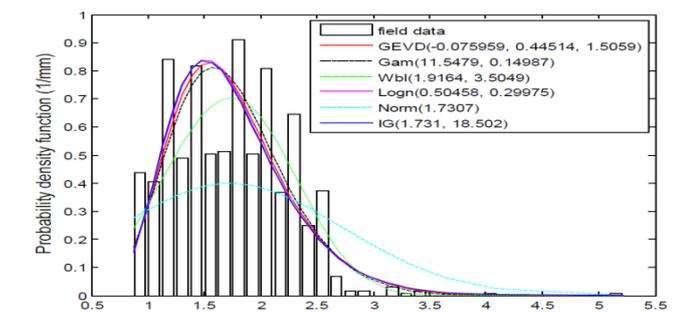


Figure III.1 : La profondeur de défaut de corrosion (mm)

A. Manalo et al. ont établi des tests mécaniques de traction sur un pipe réparé par matériaux composites pré-imprégnés. Les résultats ont montré que l'élimination des poches d'air lors de la réparation entraînait de meilleures propriétés mécaniques en raison de la meilleure consolidation des couches de fibres. Les résultats ont montré que cette méthode est efficace pour réparer les pipes fissurés et corrodés et les rendent à leurs performances initiales.[24]

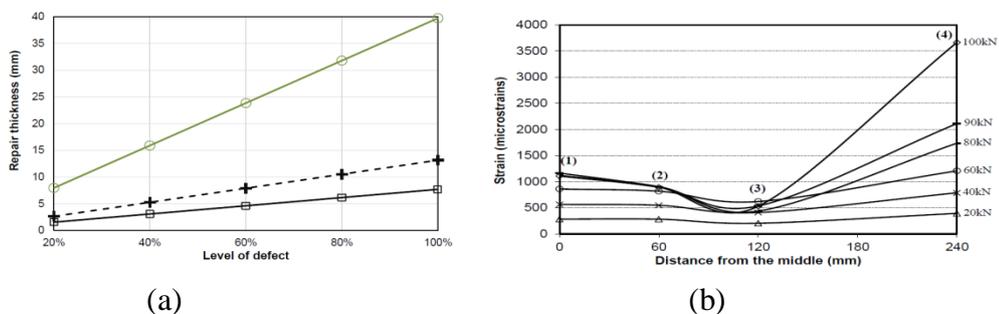


Figure III.2 : Épaisseur de réparation de patch requise pour différents niveaux de défauts (a). Relation de charge et de contrainte du faisceau avec un défaut de fissure (b).

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

Dans son travail, Maciej Witek présente une étude probabiliste appliquée pour évaluer les défauts de corrosion externes d'une pipe. Les résultats de son étude doit aider les ingénieurs de maintenance à résoudre les problèmes par une stratégie basée sur la fiabilité optimale de gestion des conduites à haute pression. [25]

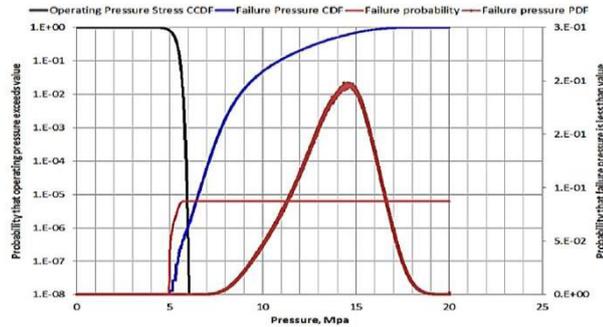


Figure III.4 : Probabilité d'endommagement pour l'épaisseur de et sa réduction globale du temps due à une corrosion.

M. Benziane et al ont comparé les performances de la réparation longitudinale de fissures dans les pipelines de type API-X65 dans deux conditions différentes : avec des patches et sans patch. La méthode des éléments finis tridimensionnelle FEM a été utilisée pour calculer les facteurs d'intensité de contrainte au niveau de la fissure. La réparation des fissures sous pression interne en utilisant des composites carbone-époxy a été étudiée, le diagramme d'évaluation des défaillances a été introduit pour obtenir la valeur du facteur de sécurité. Les résultats obtenus indiquent que la valeur de ce facteur dépend à la fois de la longueur de la fissure et de la pression. En outre, les résultats ont montré que la technique suggérée est admissible pour prédire le comportement des réparations. [44]

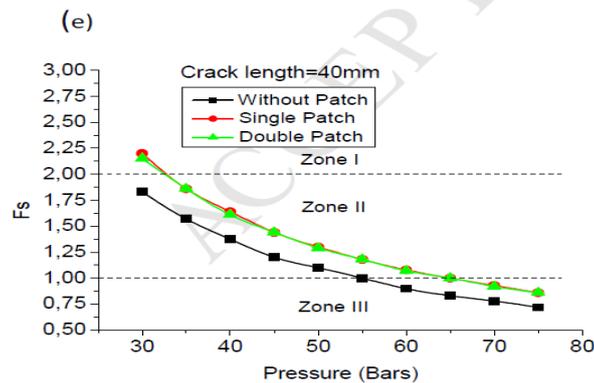


Figure III.5 : Facteur de sécurité (FS) par rapport à la pression appliquée pour les trois zones de fissures

Le travail de S.A. Timashev et al est d'étudier la croissance de défaut de corrosion d'un tuyau et sa mise en œuvre pour évaluer la probabilité conditionnelle de défaillance. Il a montré comment construire un modèle de Markov pour la longueur, la profondeur et la largeur des défauts, en utilisant un champ des données recueillies par inspection

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

interne ou évaluation directe ou en utilisant une combinaison d'une équation différentielle qui décrit la croissance des paramètres de défaut avec la méthode de simulation de Monte Carlo. Ce modèle permet de prendre en compte la pression ultime du pipeline, un algorithme est construit pour prédire de la prochaine inspection ou réparation. [26]

Mokhtari et al ont proposé une étude d'utilisation de fibres pour renforcer les canalisations enterrées en acier de type API 5LX65 soumis à des déformations en utilisant la méthode des éléments finis à l'aide du code ABAQUS. Selon les résultats obtenus, le concept d'utilisation des polymères renforcés de fibres pour la réparation des pipelines d'acier enterré sous des déformations permanentes du sol peuvent être mis en œuvre. [27]

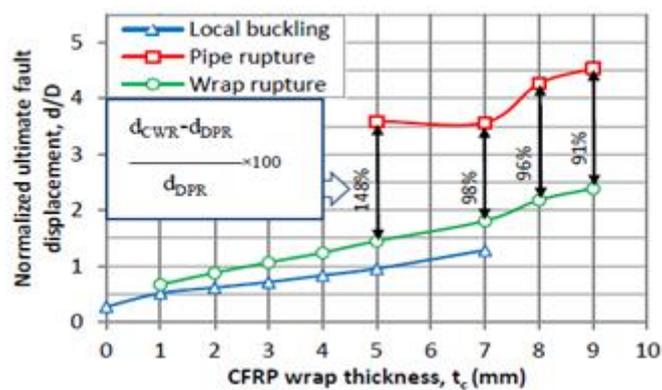


Figure III.6 : déplacement de défaut ultime normalisé pour divers critères de performance et valeurs différentes de épaisseur de préparation

M. Paim et al ont réparé des pipelines métalliques subissant des déformations élastiques ou inélastiques avec des dommages de corrosion localisés. La principale motivation de l'étude présentée est la réhabilitation de pipelines corrodés transportant de l'eau produite dans des plates-formes pétrolières offshore. [28]

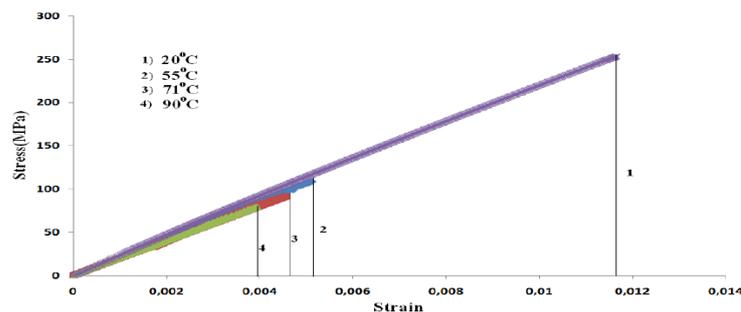


Figure 2: stress vs. strain at different temperatures.

Figure III.7 : Comportement de la contrainte en fonction du déplacement subi par un pipeline pour différentes températures

Mattos et al. ont fait une analyse sur des tuyaux corrodés renforcés par des patches en composites à base de polymère. Le but est de proposer une méthodologie simple pour

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

prédire la pression ultime d'un pipeline. Des tests différents hydrostatiques réalisés en laboratoires ont été utilisés pour valider la méthodologie proposée.[29]

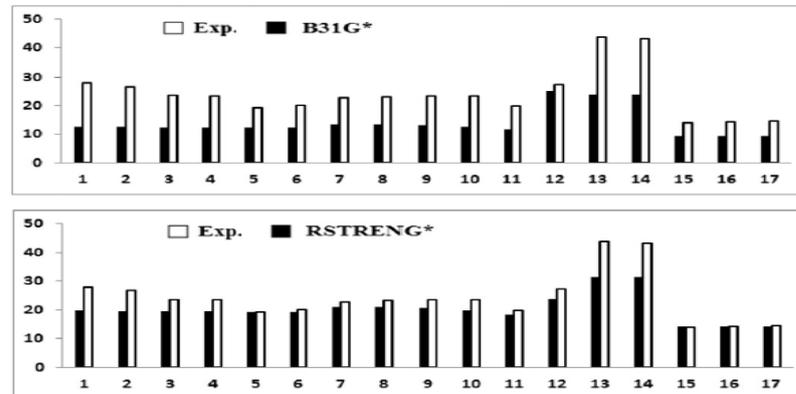


Figure III.8 : Comparaison entre les pressions prévues et expérimentales pour différents critères (en mPa).

R. Khelif et al ont présenté une étude d'un modèle élément fini qui simule le phénomène de la corrosion et son influence sur la rupture des pipelines en utilisant une méthode fiabiliste. Un modèle numérique a été développé sous le code Ansys, afin de simuler les différentes charges pour déterminer le facteur de concentration des contraintes. A la base de ce modèle, la contrainte de Von Mises est déterminée. [30]

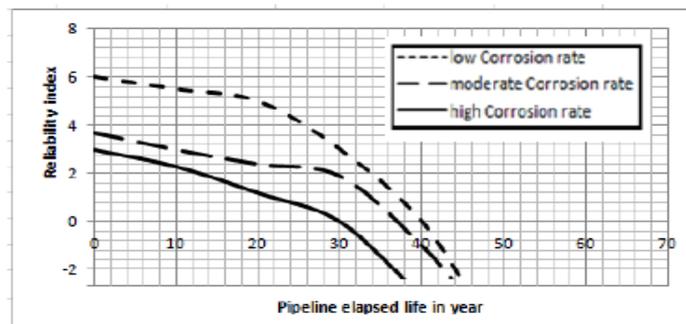


Figure III.9 : Effet de la corrosion sur la fiabilité du pipeline.

Le travail de Chan et al est une étude de la performance d'un pipe en acier réparée avec un composite polymère renforcé de fibres soumis à une charge de flexion. L'analyse par éléments finis a été utilisée pour simuler le comportement charge-déformation du système réparé. Le modèle a été validé par un travail expérimental de la flexion en quatre points. Les paramètres étudiés dans le cadre de la simulation FE et les tests expérimentaux sont basés sur trois conditions d'un pipe non corrodé, corrodé et corrodé réparé par patch en composite carbone/époxy. Leurs résultats montrent que l'orientation de fibre suivant un angle de 0° est la méthode la plus efficace pour la réparation avec un patch. [31]

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

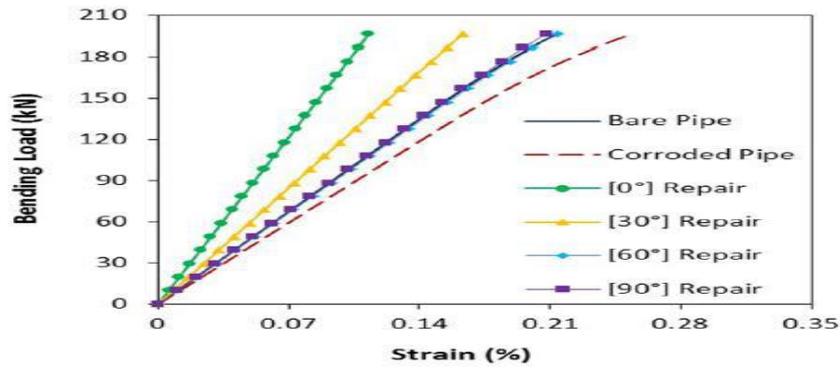


Figure III.10 : charge-déformation d'un pipe saine, corrodé et corrodés réparé avec différentes orientation des fibres

K. Yeoma et al. dans cette étude un essai d'éclatement est fait pour déterminer la pression ultime d'un pipeline, les résultats obtenus sont utilisés pour simuler les longueurs et la profondeur des défauts grâce à la méthode des éléments finis pour les formes et les propriétés physiques identiques à celles d'une conduite à échelle réelle. [32]

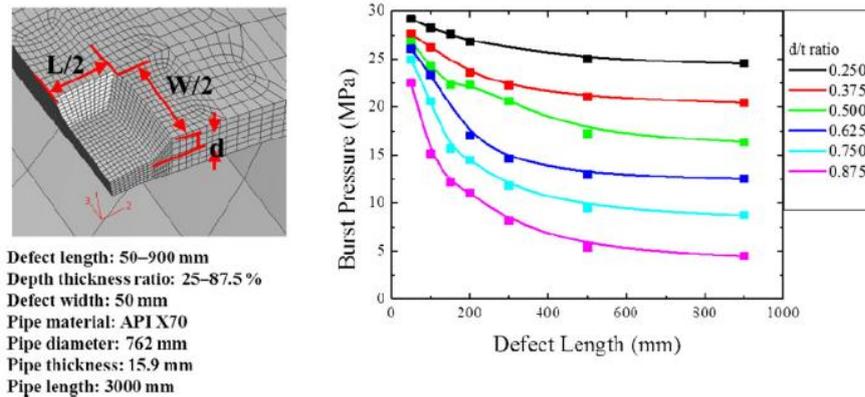


Figure III.11 : la pression d'éclatement du tube API X70 en fonction des différentes profondeurs et longueurs de défauts

M.Shamsuddoha et al ont présenté une méthode complète de l'utilisation des polymères enforcés de fibres pour la réparation de canalisations arienne, souterraines et sous-marines.. Les aspects critiques des défis techniques, les avantages et les insuffisances dans la détermination de la faisabilité et de la pertinence pour les systèmes de réparation impliquant les composites sont également présentés.[33]

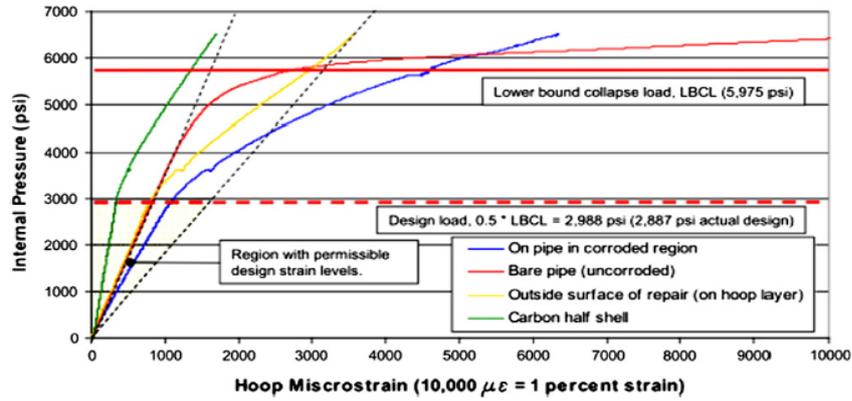


Figure III.12 : Déformation circonférentielle en fonction de la pression interne appliquée aux systèmes réparés

J.B. Choi et al ont réalisé une série de tests avec différents types des piqûres. Des simulations par éléments finis sont effectuées pour obtenir un critère de rupture approprié. Ensuite, des analyses par éléments finis sont effectuées pour obtenir une solution de charge limite pour les gazoducs X65 corrodés en fonction de la profondeur du défaut et de la longueur du pipeline.[34]

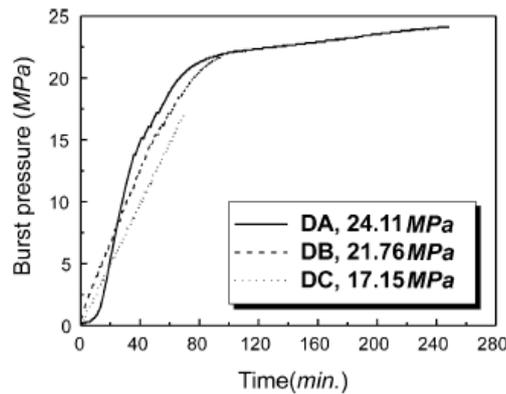


Figure III.13 : Variation de pression pendant l'essai d'éclatement pour diverses corrosions profondeurs.

III.3. Étude analytique des rapports contrainte, pression interne pour les pipelines:

Les contraintes dans le pipeline sont la contrainte radiale σ_r , la contrainte circonférentielle σ_θ et la contrainte de traction σ_z . ces contraintes s'expriment par les relations suivantes en fonction de la variable r.

$$\sigma_{rr} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_e^2}{r^2}\right) \quad (III.1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_e^2}{r^2}\right) \quad (III.2)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \quad (III.3)$$

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

III.3.1. La contrainte de Von Mises

Pour le calcul des tubes de pipelines, il est plus commode d'employer cette théorie en utilisant des coordonnées cylindriques, dont les composantes des efforts sont combinées en un seul effort efficace selon l'équation de Von Mises.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2} \quad (\text{III.4})$$

III.4. Analyse élastique des éléments de conduites avec corrosion :

Des chercheurs ont analysé la résistance des tuyaux dans une situation idéale ou il n'existe pas des défauts dans les tubes. Du fait que les tubes peuvent être corrodés, et que le phénomène de corrosion est un problème à prendre en compte puisqu'il est considéré comme l'une des causes d'endommagement des tubes les plus répandues. L'ensemble des lois expérimentales qui ont mis un seuil de pression critique et qui ils permettent de prendre en considération ces défauts de corrosion. Ces lois ont donné deux types de défauts cylindriques et rectangulaires d'une manière comparative et en conformité avec les règles de calculs. La figure III.15 présente les dimensions d'une manière générale.

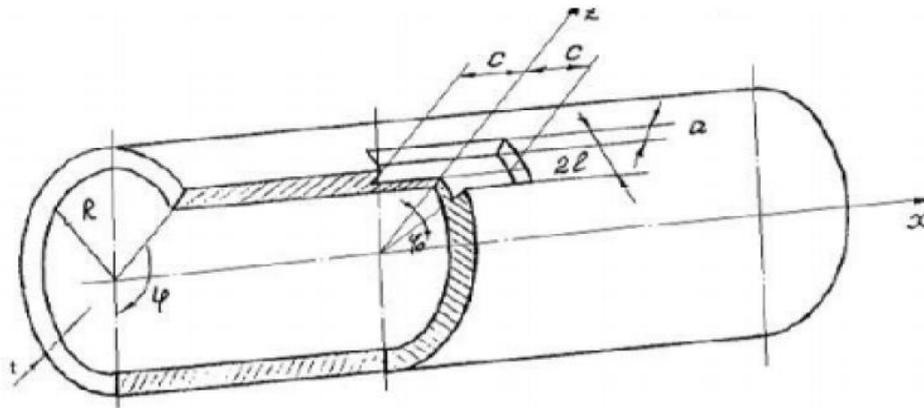


Figure III.14 : Représentation de défaut sur un tube.

III.5. Théorie linéaire classique de l'élasticité [35]

On définit la présentation des relations caractéristiques du comportement élastique des éléments structuraux ce que l'on appelle habituellement la théorie de l'élasticité, basée sur les hypothèses de petits déplacements et de linéarité entre contraintes et déformations.

III.5.1 Déformations linéaires

Lorsqu'un corps est soumis à un système de forces, en général tous les points appartenant au corps changent de position. Le déplacement point est défini comme étant la distance séparant sa position initiale de sa position finale. Les composantes de ces déplacements sont U , V et W , elles sont en général fonction de x , y et z .

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

III.5.2. Les déformations directes

La déformation directe dans une direction donnée est définie comme étant le rapport de la variation de la longueur, d'une fibre originalement orientée dans cette direction. Trois composantes indépendantes de déformation directe (normale) sont définies en chaque point.

III.5.3. Les déformations de cisaillements

La déformation de cisaillement est définie comme étant la variation de l'angle droit formé par deux axes. Elle est associée à deux directions orthogonales. Trois composantes de déformation de cisaillement sont définies en chaque point. Le tenseur de déformation est défini comme suit :

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 2\varepsilon_{xy} & 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{zx} & 2\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx}$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy}$$

Les composantes ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{zz} (parfois notées simplement ε_x , ε_y , ε_z) sont les déformations dites normales (directes) ; ε_{xy} , ε_{xz} et ε_{yz} (ou γ_{xy} , γ_{xz} et γ_{yz}) sont les déformations de cisaillement.

III.5.4. Loi de comportement

Il existe une relation linéaire entre les contraintes et les déformations, cette relation dépendant des directions dans lesquelles on se place. Cette relation s'appelle la loi de comportement (élastique linéaire) du matériau. Si la loi de comportement, en un point donné, est indépendante de la direction des axes choisis, on dira qu'elle est homogène. La loi de Hooke est valable pour un matériau dont la loi de comportement est élastique linéaire isotrope : en tout point, il existe des coefficients l et m , dits coefficients de Lamé (qui dépendent de ce point) tel que :

$$\forall i, j \in \{1, 2, 3\}, \quad \sigma_{ij} = \lambda \cdot \varepsilon_{ll} \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{ij} \quad (\text{III.7})$$

Où δ_{ij} est l'indice de Kronecker défini par :

$$\forall i, j \in \mathbb{N}, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

On note parfois la relation (III.7) sous forme matricielle :

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$$

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2.\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2.\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & \lambda + 2.\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.\mu \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \end{pmatrix} \quad (\text{III.9})$$

La loi de Hooke peut s'inverser sous la forme :

$$\forall i,j \in \{1,2,3\}, \varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{ll} \delta_{ij} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$$\nu = \frac{\lambda}{2.(\lambda + \mu)} \quad E = \frac{\mu.(3.\lambda + 2.\mu)}{\lambda + \mu} \quad G = \frac{E}{2.(1 + \nu)}$$

$$\lambda = \frac{\nu.E}{(1 - 2.\nu).(1 + \nu)} \quad \mu = \frac{E}{2.(1 + \nu)}$$

Un matériau élastique et isotrope peut être caractérisé par deux coefficients élastiques indépendants E et ν .

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1 + \nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1 + \nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1 + \nu) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} \quad (\text{III.11})$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} = \frac{E}{(1 + \nu).(1 - 2.\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1 - 2.\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1 - 2.\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1 - 2.\nu) \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \quad (\text{III.12})$$

III.6. Codes d'évaluation

III.6.1. Un peu d'histoire sur les méthodes d'évaluation des pipelines à défauts

L'effet des défauts dans les structures a été étudié qualitativement à partir du 15ème siècle par Leonard de Vinci.[36] Celui-ci a mesuré la force d'élongation d'un fil de fer, et a observé que la force d'élongation du fil était plus importante pour un fil court qu'un fil long. Il a introduit le concept de distribution volumique des défauts.

En 1920, Griffith [37] a publié pour la première fois une formule reliant la contrainte à rupture à la taille des irrégularités (défauts). Cette relation découle d'un simple bilan énergétique à partir d'une analyse des contraintes au niveau d'un trou elliptique faite précédemment et de la première loi de la thermodynamique. Toutefois, ces travaux sont applicables uniquement aux matériaux parfaitement élastiques. Dans les années 1950, il

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

y avait un intérêt majeur pour l'industrie aéronautique aux Etats- Unis, notamment pour la rupture des alliages d'aluminium, et dans les années 1960, cet intérêt s'est déplacé aux risques de rupture dans les centrales nucléaires. Cela conduira à la mise au point de la mécanique élastoplastique de la rupture en utilisant diverses approches (facteur d'intensité de contraintes (K), Intégrale J et écartement de fissure (CTOD)).

Les décennies 1950 et 1960 ont également été une période où la sécurité des canalisations de gaz et de pétrole a commencé à préoccuper les compagnies pétrolières, principalement aux Etats-Unis en raison de la taille et du vieillissement des ces canalisations. Les premiers travaux de recherche sur la rupture des pipelines présentant des défauts ont été réalisés par John F. Kiefner et al. à l'institut de Battelle [38]. C'est grâce aux leurs travaux que le code ASME 1 / ANSI 2 B31G a été développé, le code "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines" a été publié pour la première fois en 1984 au Etas Unis. Il a été modifié et republié en 1991.

D'autres codes et manuels ont été développés depuis, citons : le code DNV, le code RSTRENG, API 579 et le manuel PDAM qui sera développé en partie par la suite.

L'organigramme III.16 donne une petite illustration de quelques outils (codes et manuels) et leurs développements et validations avec le temps dans le cas des canalisations comportant des défauts.

Prenant le code ASME B31 G a été créé pour la première fois en 1984 suite aux essais d'éclatement de Kiefner, Massey et al. à l'institut mémorial du Batelle aux Etats-Unis, ce code à été modifié en 1991 [39], et a donné par la suite la naissance du code RSTRENG, la validation de ce dernier a été faite par Keifner et al. 1996. Les résultats de RSTRENG ont servis pour la création du code RSG 313. Le PDAM [40] est le fruit des résultats des essais d'éclatement de British Gaz. La méthode des éléments finis a contribué à sa validation et vérification.

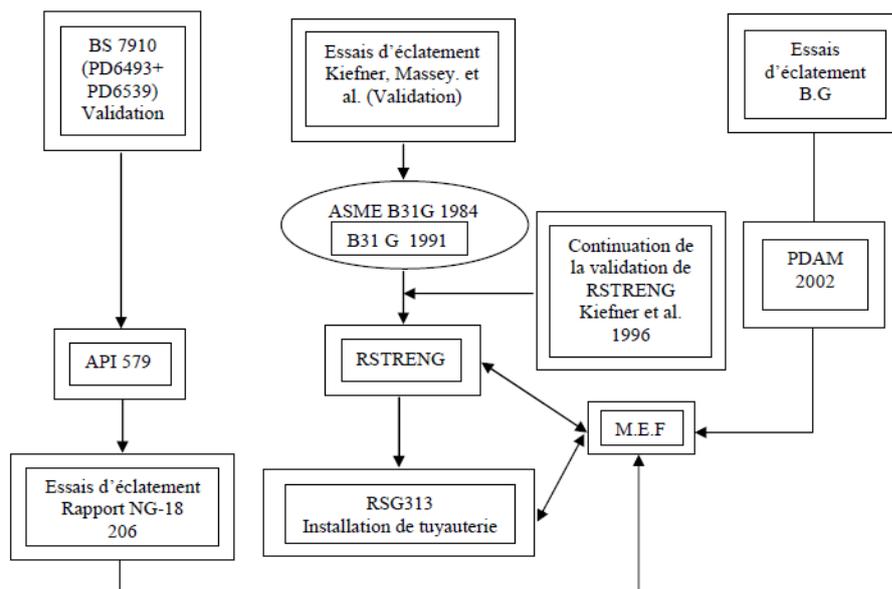


Figure III.15 : Les différents outils et codes utilisés pour l'évaluation des pipelines à défauts ainsi que leurs développements avec le temps

III.6.2.ASME B31G [41]

Le code ASME B31G est un code destiné à évaluer la résistance à la rupture résiduelle d'une pipe corrodée. Il constitue un additif au code ASME B31 utilisé pour les tubes. Ce code a été développé dans les années 60 au Battelle Memorial Institute (USA) et donne des méthodes semi empiriques pour vérifier la tenue en service de pipe corrodés. Basé sur un nombre relativement important d'essais sur des sections du pipe corrodées, il a été constaté que les aciers utilisés pour les pipes ont en générale une ténacité suffisante pour permettre la rupture ductile et donc que la ténacité n'est pas le paramètre essentiel mais la profondeur de corrosion. La rupture amorcée sur des défauts de corrosion émoussés est contrôlée par leur taille et la contrainte d'écoulement du matériau R_c . Les paramètres d'entrée comportent le diamètre extérieur du pipe (D_{ext}), l'épaisseur (t), la limite d'élasticité minimale requise, la pression de service maximale, l'extension maximale longitudinale de la corrosion ($2c$) et la profondeur du défaut (a). Selon le Code ASME B31G, l'équation de la rupture de tubes corrodés est établie à partir des données expérimentales et exprimée à partir des deux conditions suivantes :

- Premièrement, la contrainte circonférentielle globale maximale ne peut pas excéder la limite d'élasticité du matériau.
- Deuxièmement, un défaut de corrosion court est assimilé à sa projection selon une forme parabolique et un défaut de corrosion long est projeté selon une forme rectangulaire.

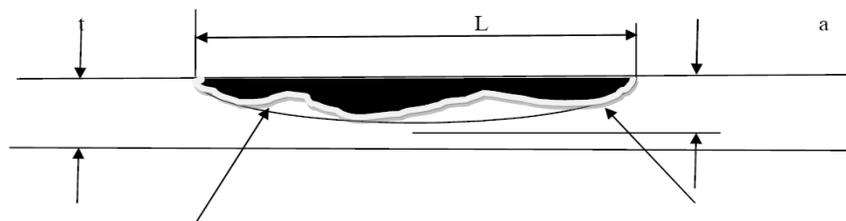


Figure III.16 : Défaut de corrosion court projeté selon une forme parabolique.

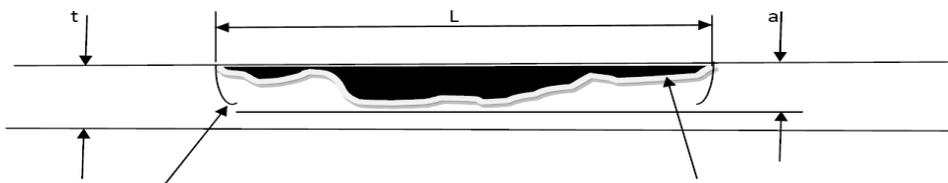


Figure III.17 : Défaut de corrosion long projeté selon une forme rectangulaire

La surface de corrosion est calculée par cette formule $A_{C0} = t * 2c$ représentée sur la figure III.18

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

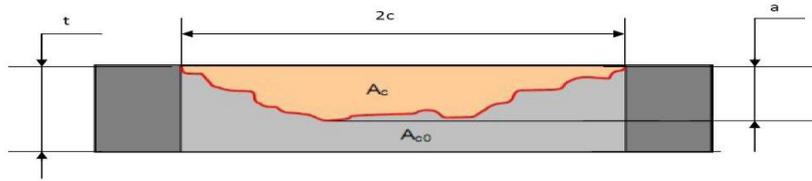


Figure III.18 : Face longitudinale imaginaire d'un défaut de corrosion.

Selon ASME B31G la longueur de défaut de corrosion peut être sous forme parabolique ou rectangulaire. Pour des secteurs plus courts de corrosion, quand la longueur axiale de la surface affectée L est inférieure ou égale à $(\sqrt{20 * D * t})$ la forme parabolique est employée.

Si $2c \leq \sqrt{20 * D * t}$ la forme est parabolique (III.13)

La figure III.19 présente la surface corrodée sous forme parabolique pour un défaut de corrosion relativement court (selon ASME B31G).

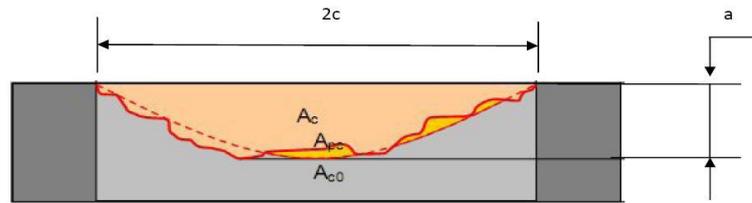


Figure III.19 : Surface corrodée parabolique supposée pour le défaut relativement court de corrosion (selon ASME B31G).

La projection de la surface A_c de défaut est définie par la relation (III.14) :

$$A_c = \frac{2}{3} a * 2c \quad (III.14)$$

La pression ultime pour des défauts courts est définie comme :

$$P_{ult} = \frac{2(1.1R_e)*f*T*t}{D_{ext}} \left[\frac{(1 - \frac{2}{3}(\frac{a}{t}))}{(1 - \frac{2}{3}(\frac{a}{t\sqrt{1+A^2}}))} \right] \quad (III.15)$$

- f : facteur de conception approprié d'ASME B31.4 et d'ASME B31.8 ou d'ASME B31.11 (normalement égale à 0.72).
- T : la température sous sollicitant.

Dans les équations (III.15) les facteurs f et T ne sont pas pris en compte. La plupart des auteurs supposent que les compagnies emploient leurs propres facteurs de sûreté de toute façon.

Le coefficient de flambage est défini comme :

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

$$M = \sqrt{1 + 0.8 * \frac{(2a)^2}{D_{ext} * t}} \quad (III.16)$$

Quand la longueur axiale de la surface affectée L est supérieure ou égale à $(\sqrt{20 * D * t})$ la forme parabolique est employée.

$$2c > \sqrt{20 * D * t} \quad (III.17)$$

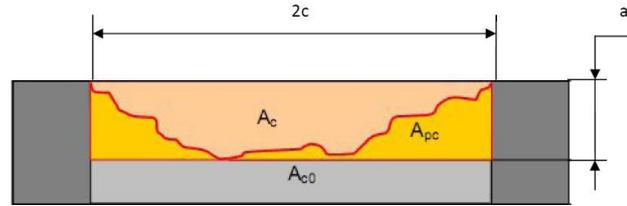


Figure III.20 : Secteur rectangulaire supposé corroder pour un plus long défaut de corrosion (selon ASME B31G /34/).

Pour ces longs défauts le secteur projeté A_{pc} est définie par :

$$A_c = a * 2c \quad (III.18)$$

La pression ultime est décrite par l'équation (III.19):.

$$P_{ult} = \frac{2(1.1R_e) * f * T * t}{D_{ext}} \left[1 - \left(\frac{a}{t} \right) \right] \quad (III.19)$$

La valeur de facteur de flambage est définie a l'infinie ($M = \infty$)

Récapitulatif, ASME B31G contient des limitations, qui le rendent impossible de couvrir tous les défauts de corrosion, matériaux de pipe et charges.

III.6.2.1. Pression ultime pour un Défaut parabolique :

Pour calculer la pression ultime, il faut d'abord connaître la surface A de défaut

$$A = \sqrt{0.8 \left(\frac{2a}{D_{ext}} \right)^2 \left(\frac{D_{ext}}{t} \right)} \quad (III.20)$$

Si la surface de défaut A est inférieure ou égale à 4 ($A \leq 4$) la pression ultime est égale à :

$$P_{ult} = \frac{2(1.1R_e)t}{D_{ext}} \left[\frac{\left(1 - 0.667 \left(\frac{a}{t} \right) \right)}{\left(1 - 0.667 \left(\frac{a}{t} \right) / M \right)} \right] \quad (III.21)$$

le coefficient de la flambage est égale a :

$$M = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{2a}{D_{ext}} \right)^2 \left(\frac{D_{ext}}{t} \right)} = \sqrt{1 + A^2} \quad (III.22)$$

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

La relation(III.21) devient :
$$P_{ult} = \frac{2(1.1R_e)t}{D_{ext}} \left[\frac{\left(1 - \frac{2}{3}\left(\frac{a}{t}\right)\right)}{\left(1 - \frac{2}{3}\left(\frac{a}{t\sqrt{1+A^2}}\right)\right)} \right] \quad (\text{III.23})$$

la limite d'écoulement R_c est prise égal à : $R_c = 1.1 * R_e \quad (\text{III.24})$

III.6.2.2.Pression ultime pour un Défaut rectangulaire :

Pour un défaut rectangulaire, la pression ultime est définie comme suit :

$$P_{ult} = \frac{2(1.1R_e)t}{D_{ext}} \left[1 - \left(\frac{a}{t}\right) \right] \quad (\text{III.25})$$

III.6.3. ASME B31G modifié ou 085DL : [37]

Dans le code ASME B31G modifié la limite d'écoulement est considérée comme égale à :

$$R_m = 1.1R_e + 69 \text{ (MPa)} \quad (\text{III.26})$$

Dans le cas où $\left(\frac{2a}{R_{ext}}\right)^2 \left(\frac{R_{ext}}{t}\right) \leq 50$ ou $A \leq 6.3$ (III.27)

La pression ultime est :
$$P_{ult} = \frac{2(R_e+69)t}{D_{ext}} \left[\frac{1-0.85\left(\frac{a}{t}\right)}{1-0.85\left(\frac{a}{t}\right)/M} \right] \quad (\text{III.28})$$

Le facteur de flambement M est égal à :

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^2 \left(\frac{D_{ext}}{t}\right) - 0.003375 \left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^4 \left(\frac{D_{ext}}{t}\right)^2} \quad (\text{III.29})$$

Dans le cas où : $\left(\frac{2c}{R_{ext}}\right)^2 \left(\frac{R_{ext}}{t}\right) > 50$ ou $A > 6.3$ (III.30)

La pression ultime est donné par la relation suivante :

$$P_{ult} = \frac{2(R_c)t}{D_{ext}-t} \left[\frac{1-\left(\frac{a}{t}\right)}{1-\left(\frac{a}{t}\right)/Q} \right] \quad (\text{III.31})$$

III.6.4. Application du code ASME B31G modifié :

Le facteur de flambement M est égale à :

$$M = 3.3 + 0.032 \left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^2 \left(\frac{D_{ext}}{t}\right) \quad (\text{III.32})$$

Dans ce cas, la pression ultime décroît toujours avec la profondeur du défaut. La pression ultime calculée est peu sensible à la forme du défaut utilisé et les résultats sont beaucoup plus conservatifs dans le cas du code ASME B31G modifié. Il faut

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

mentionner que l'utilisation du code ASME B31G est limitée à des défauts de corrosion avec un facteur de concentration de contrainte faible.

Le chargement est aussi limité à une pression interne. L'extension latérale du défaut n'est pas prise en compte mais une attention particulière sur les défauts réels tri dimensionnel montre que son influence est mineure. Dans le cas où le défaut est non admissible selon le code ASME B31G, il est permis de reprendre l'analyse ou de faire un essai de pressurisation.[42]

III.6.5. ASME PCC-2 :

C'est un code qui fournit des méthodes de réparation d'équipements mécanique statique et des tuyauteries tel que les pipes. Ces méthodes de réparation incluent des pratiques de conception, de fabrication, d'examen et de tests pertinents et peuvent être temporaires ou permanentes, selon les circonstances. Les méthodes fournies dans cette norme traitent la réparation des composants lorsque la réparation est jugée nécessaire en fonction de l'inspection appropriée et de l'évaluation des défauts.

On peut définir une relation entre contrainte et la déformation en utilisant le model de matériel de Ramberg–Osgood [43] représenté par la relation (III.33).

$$E_\varepsilon = \sigma + \alpha \left(\frac{|\sigma|}{\sigma_y} \right)^{n-1} \quad (\text{III.33})$$

On peut aussi définir l'épaisseur minimale nécessaire pour la réparation t_{\min} par le code ASME PCC-2 à partir de l'équation suivante : [42].

$$t_{\min} = \frac{D}{2SMYS} \left(\frac{E_s}{E_c} \right) \left(\frac{2F}{\pi D^2} - P_s \right) \quad (\text{III.34})$$

On peut aussi calculer la longueur de réparation [42] à partir de l'équation suivante :

$$L = 5\sqrt{Dt/2} + L_d + 2L_t \quad (\text{III.35})$$

III.7. Le PDAM (The Pipeline Defect Assessment Manual)[43]

Il existe plusieurs codes et manuels techniques d'évaluation des défauts dans les canalisations, les plus utilisés ont été cités précédemment, ces dernier utilisent simultanément la mécanique de rupture et l'analyse limite. Les résultats analytiques et numériques obtenus sont renforcés par des résultats expérimentaux ou ce qui est appelé le PDAM

PDAM est un manuel d'évaluation des défauts dans les pipelines. Ce dernier contient les différentes techniques disponibles actuellement pour l'évaluation des défauts des canalisations (corrosion, soudures, éraflures, ...). Ce manuel est basé essentiellement sur des essais mécaniques et permet de maintenir un niveau de sécurité élevé. En plus de l'identification des meilleures méthodes, ce manuel a servi aussi à donner les limites empiriques de l'application des méthodes existantes. Ce document est considéré comme une aide pour la maintenance des canalisations pouvant présenter des défauts. Il a été établi en août 2002. Le PDAM peut évalués des différents types des défauts comme les

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

défauts de corrosions, les éraflures, les enfoncements, Différents types de défauts dans les soudures et les fissures).

III.8. Conclusion

Cette recherche bibliographique nous a permis d'entreprendre certaines initiatives pour pouvoir étudier et évaluer d'une façon adéquate les principaux défauts des pipelines ainsi les différentes codes de calcul et d'évaluation de défaut de corrosion ont été présentées dans ce chapitre.

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter en première partie le code de calcul d'élément finis choisis ANSYS Mechanical APDL avec lequel nous ferons notre étude. La deuxième partie sera la validation de nos résultats en la comparant au le travail de chan.[31]

La troisième partie comporte une simulation numérique afin de suivre l'évolution des contraintes radiales et circonférentielles. Elle comporte trois parties, nous avons considéré dans un premier temps la structure d'un pipe d'acier grade API 5L X60 sans défaut, dans un deuxième temps la structure comportant un défaut de corrosion présenté sous forme rectangulaire et nous terminerons cette simulation en considérant un pipeline réparée par patch en composite avec différentes orientations des fibres, différentes épaisseurs et différents types de matériaux composite. L'objectif est de montrer l'efficacité de la réparation par collage de patch en matériaux composites.

IV.2.Modélisation et simulation numérique

IV.2.1.Présentation de code calcul Ansys Mechanical APDL

ANSYS est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils intégrés au logiciel permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts.

Ces problèmes comprennent l'analyse statique / dynamique, l'analyse structurale, le transfert de chaleur et les problèmes de fluide, ainsi que les problèmes acoustiques et électromagnétiques. Il existe deux méthodes pour utiliser ANSYS. Une méthode consiste à utiliser l'interface utilisateur graphique (GUI). Cette méthode suit les conventions des programmes populaires Windows et X-Windows. Une autre méthode consiste à utiliser les fichiers de commandes. L'approche du fichier de commande présente une courbe d'apprentissage plus abrupte pour beaucoup, mais elle présente l'avantage que toute l'analyse peut être décrite dans un petit fichier texte, généralement dans moins de 50 lignes de commandes. Cette approche permet des modifications simples du modèle et des exigences minimales en matière d'espace de fichiers. L'environnement ANSYS contient deux fenêtres: la fenêtre principale et la fenêtre de sortie. Un grand nombre de fichiers sont créés lorsqu'ANSYS est exécuté. Si ANSYS démarre sans spécifier un nom de travail, le nom de tous les fichiers créés sera "file. *", Où "*" représente différentes extensions. Une fois que le programme ANSYS a démarré et que le nom du travail a été spécifié, seule la commande reprise doit être activée pour partir de l'origine du dernier modèle. Si les fichiers de commande ANSYS sont prévus pour être utilisés, seul le fichier de commande (and / or) le fichier journal doivent être stockés.

IV.2.2. Représentation de la géométrie et caractéristiques mécanique

Le pipe à étudier est de diamètre extérieur $D_{ext} = 219$ mm, diamètre intérieur $D_{int} = 198.4$ mm, longueur $L = 4570$ mm et d'épaisseur $t = 10.3$ mm. Le pipe est de type API

5L X60, les caractéristiques mécaniques de matériaux sélectionnés sont présentées dans le tableau IV.1

Paramètre	Valeur
Module de young	210 MPa
Coefficient de poisson	0.3
Limite d'élasticité	483 MPa
Coefficient de durcissement	12

Tableau IV.1 : Propriété mécanique de l'acier API 5L X60.

IV.3.Modélisation numérique d'un tube sans défaut

La figure V.1 présente le modèle géométrique du pipe. Pour des raisons de symétrie, seulement un quart du pipe est considéré avec les conditions aux limites et le maillage indiqués dans la figure IV.1

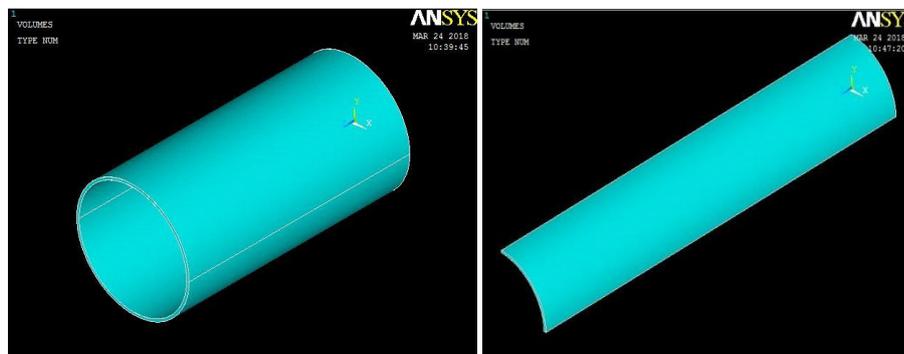


Figure IV.1 : le modèle géométrique du pipe

IV.3.1.Discrétisation du domaine d'étude en éléments finis avec l'élément solide 186

Pour notre maillage, on a choisis Solid 186 qui est un élément 3-D qui présente un comportement de déplacement quadratique. L'élément est défini par 20 nœuds ayant trois degrés de liberté par nœud. L'élément prend en charge la plasticité, hyper élasticité, fluage, la contrainte de raidissement, grande déviation. Il a également la capacité de formulation mixte pour la simulation des déformations des matériaux élastoplastiques presque incompressibles, et matériaux hyper pleinement incompressibles. La figure IV.2 présente une description de l'élément solid186.

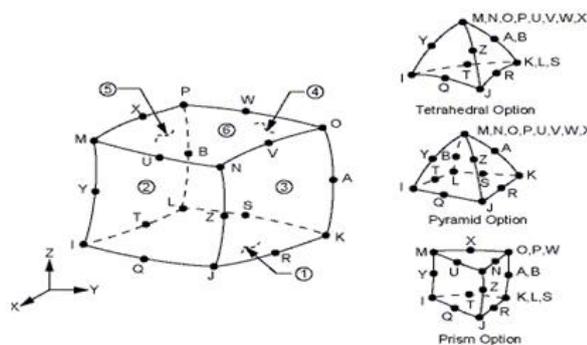


Figure IV.2 : Géométrie de SOLIDE 186.

Le maillage effectué sur la structure et le type d'élément employé pour la modélisation est tétraédrique. Les figures IV.3 et IV.4 représentent respectivement le maillage de la structure et les conditions aux limites d'un tube sans défaut.

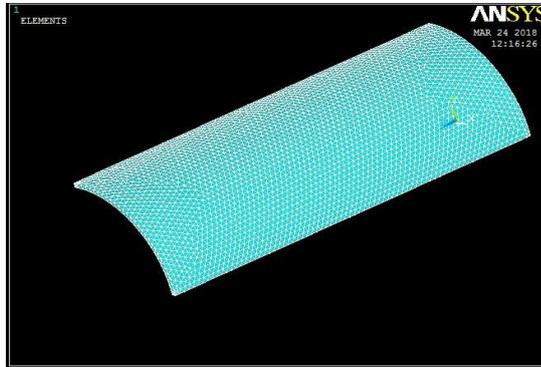


Figure IV.3 : Maillage tétraédrique d'une pipe sans défaut.

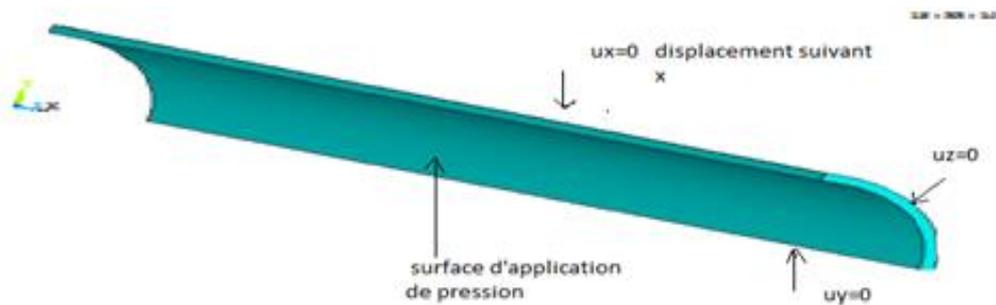


Figure IV.4 : Conditions aux limites considérées dans notre calcul.

IV.4. Modélisation numérique d'un tube avec défaut

IV.4.1. Représentation géométrique

Dans notre structure, on a modélisé la corrosion par un défaut rectangulaire qui a les dimensions suivantes, à savoir une longueur $L = 610$ mm, une largeur $S = 51$ mm et une épaisseur $e = 5.3$ mm.



Figure IV.5 : Géométrie d'un pipe avec défaut.

IV.4.2. Discrétisation du domaine d'étude en éléments finis

L'analyse est réalisée par la méthode des éléments finis tridimensionnels. Un maillage automatique sera effectué sur la structure, le type d'élément utilisé pour la modélisation est tétraédrique. La figure IV.6 représente le maillage de la structure.

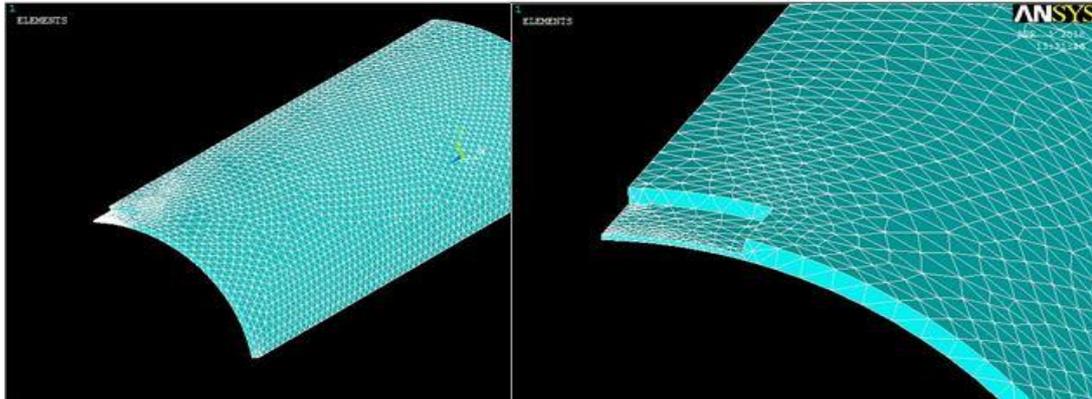


Figure IV.6 : Maillage d'un tube avec défaut.

IV.5. Modélisation numérique d'un tube comportant un défaut rectangulaire réparée par collage en composite

On réalise la réparation par remplissage de volume de la corrosion avec la résine, et collage de patch en composite, les dimensions de ce dernier sont estimé à deux fois plus que celles de la corrosion (longueur $L' = 1220$ mm, largeur $S' = 102$ mm) et nous allons varier son épaisseur. Le tableau IV.2 représente les caractéristiques mécaniques du composite utilisé.

Type de fibre	Carbone	verre	Aramide
Spécification	Pré-imprégné	Pré-imprégné	Pré-imprégné
Volume de fraction de fibre	0.6	0.62	0.6
Module de Young longitudinal (GPa)	126	53.48	112.4
Module de Young transversal (GPa)	11	17.7	3
Module de cisaillement (GPa)	6.6	5.83	20.84
Coefficient de poisson major	0.28	0.278	0.27
Coefficient de poisson selon épaisseur	0.4	0.4	0.4
Contrainte longitudinal (MPa)	1950	1500	1600
Contrainte à la compression (MPa)	1480	900	200
Allongement longitudinal de traction (%)	1.38	1.087	2.4
Allongement longitudinal de compression	1.175	0.652	0.9

Tableau IV.2. Propriété mécanique de composite (Carbon/verre/époxy).

Les figure IV.7 IV.8 représente la géométrie et le maillage respectivement après la réparation par patch en composite.

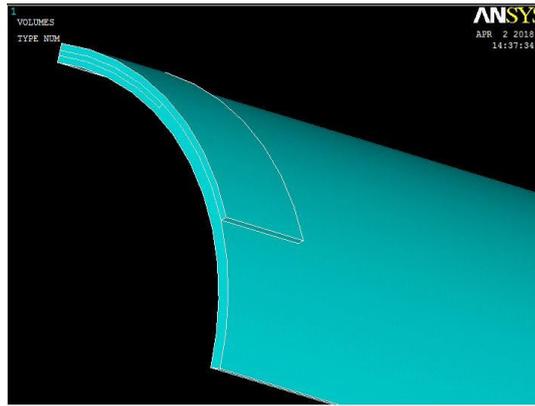


Figure IV.7 : Géométrie d'un pipe corrodé et réparé par patch de composite.

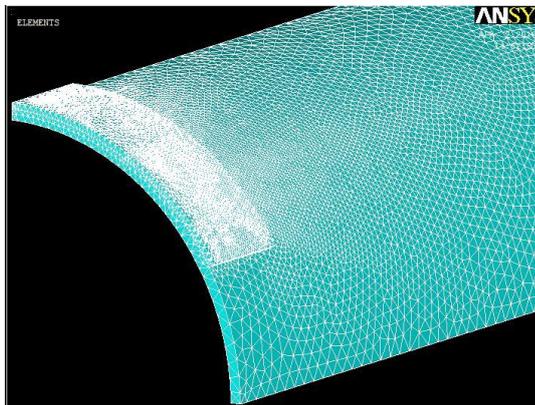


Figure IV.8 : Maillage d'un pipe réparé.

Discussion des résultats :

IV.6. Validation des résultats :

La simulation à l'aide de code de calcul APDL de deux pipes, l'un est sain, l'autre corrodé en variant la pression interne, nous permet de voir son influence sur la déformation de pipe. Les figures IV.9, IV.10, IV.11 et IV.12 montrent successivement la variation de la déformation d'un pipe sans défaut et l'autre avec défaut sous une pression interne de 5 et de 10 MPa.

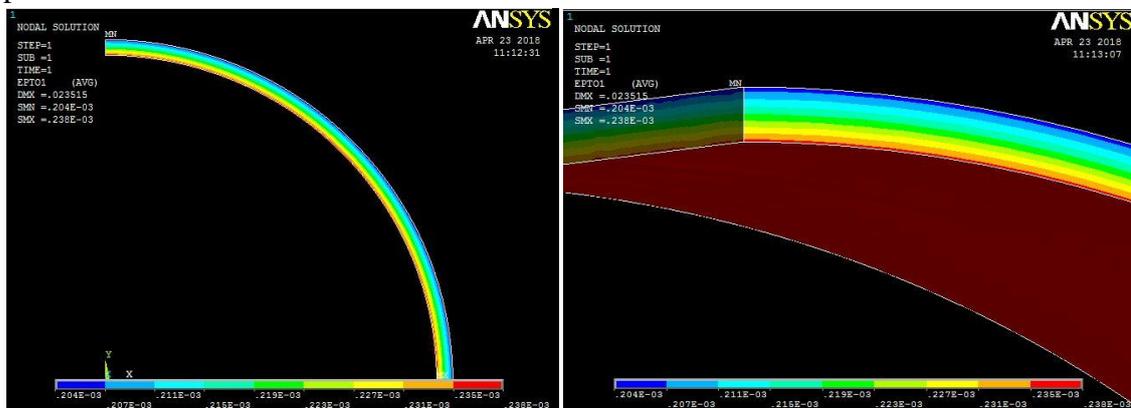


Figure IV.9 : Déformation d'un pipe sans défaut sous une pression interne de 5 MPa.

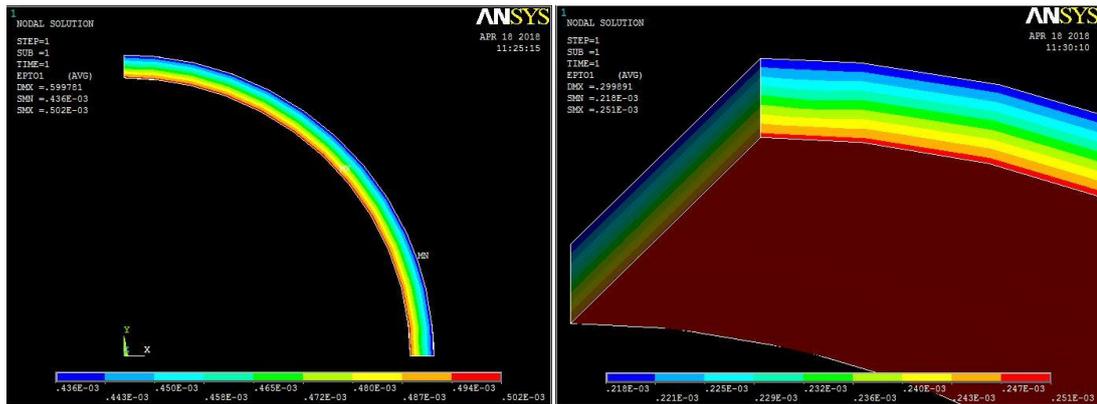


Figure IV.10 : Déformation d'un pipe sans défaut sous une pression interne de 10 MPa.

On remarque que la déformation maximale du pipe subissant une pression interne 5 MPa est situé sur la surface intérieure où cette dernière est appliquée et qui est estimé à $\epsilon_{\max} = 0.238 \cdot 10^{-3} \text{m}$, tandis que la valeur minimale de la déformation est égale à $\epsilon_{\min} = 0.204 \cdot 10^{-3} \text{m}$ qui est situé à la partie extérieure du pipe.

Pour le deuxième cas, qui a une pression interne de 10 MPa, on remarque que la déformation maximale du pipe est situé sur la surface intérieure est $\epsilon_{\max} = 0.477 \cdot 10^{-3} \text{m}$ tandis que la valeur minimale de la déformation égale à $\epsilon_{\min} = 0.407 \cdot 10^{-3} \text{m}$.

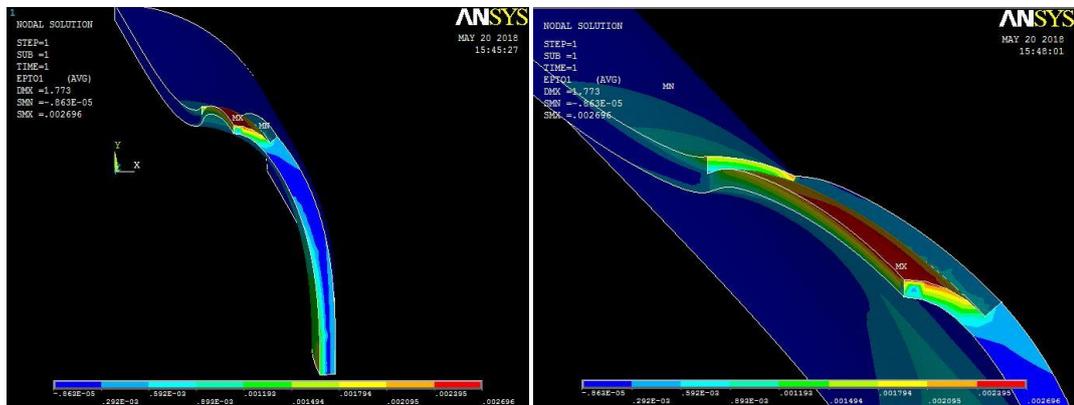


Figure IV.11 : Déformation d'un pipe avec défaut sous une pression interne de 5 MPa.

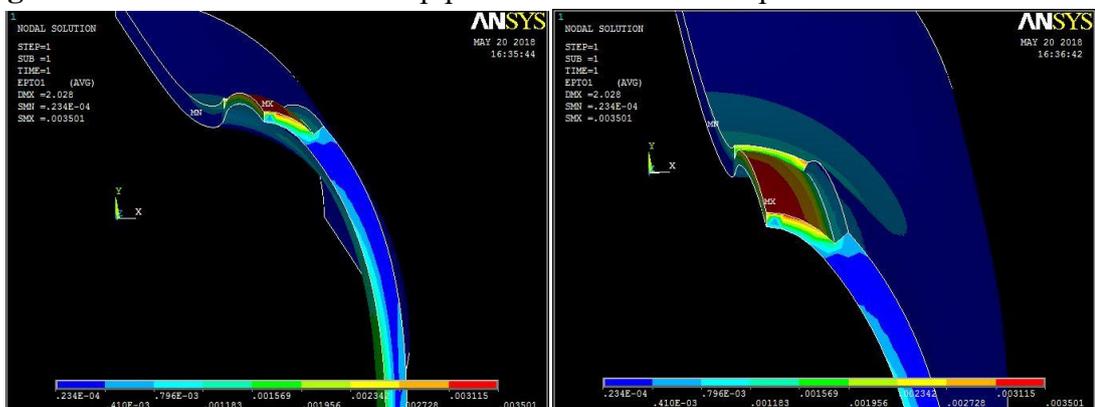


Figure IV.12 : Déformation d'un pipe avec défaut sous une pression interne de 10 MPa.

On applique une pression interne de $P_i = 5\text{m}$ sur un pipe corodé, les résultats montre que la déformation maximale du pipe vaut $\epsilon_{\max} = 2.69 \cdot 10^{-3}\text{m}$ situé aux défauts, la valeur minimale de la déformation est égale à $\epsilon_{\min} = 0.86 \cdot 10^{-4}\text{m}$.

Pour $P_i = 10\text{MPa}$, la figure IV.12 montre que la déformation maximale de pipe $\epsilon_{\max} = 3.501 \cdot 10^{-3}\text{m}$ situé au défaut alors que la valeur minimale de la déformation égale à $\epsilon_{\min} = 0.234 \cdot 10^{-4}\text{m}$.

Dans le but d'étudier la déformation d'un pipe dans deux cas distincte qui sont un pipe sein et un autre corrodé. Pour ces deux cas, on a fait varier la pressions interne jusqu'à une valeurs maximal quelle est de 40 MPa. Ainsi, on a aboutit à déduire la déformation en fonction de la pression interne. Ce résultat, nous a permet de faire une coMParaison avec le travail de Chan [31], qui va consister à nous permettre de réaliser une validation. Ce qui est illustré sur la figure IV.13.

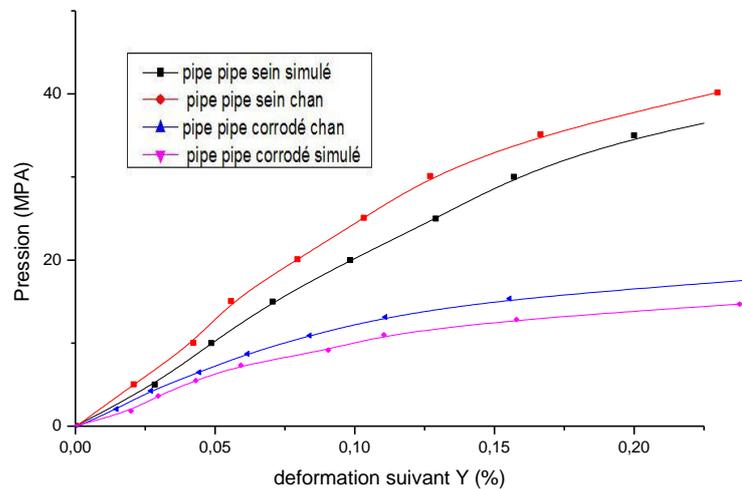


Figure IV.13 : Validation des résultats obtenus (déformation suivant Y(%))

On remarque une similitude de nos résultats avec ceux de Chan pour les deux cas de figures, à savoir un pipe sein et celui qui est corrodé. Néanmoins, on a constaté une certaines variations ou un certain écart par rapport au deux résultats. Pour cela, on a voulu valoriser cet écart. Ainsi, on calcule l'erreur relative G , minimale et maximale, qui est donné par la relation (IV.1).

$$G = \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} \quad (\text{IV.1})$$

D'après les calculs les résultats de l'erreur relative G sont montrés dans le tableau IV.3

	Pipe sein	Pipe corrodé
G_{\min}	0.093	0.088
G_{\max}	0.243	0.136

Tableau IV.3 : l'erreur relative G

Les calculs montre que l'erreur des résultats pour un pipe sein ne dépasse pas 24 % tandis que pour un pipe corrodé elle ne dépasse pas 13%. Cette erreur est causé par plusieurs paramètres:

- différence de code de calcul utilisé (ABAQUS –ANSYS).
- choix d'éléments de discrétisation ((SHEL S4R-SOLID186).
- l'erreur de troncature.
- Type de maillage (HEXAHYDRIQUE-TITRAHYDRIQUE)

IV.7. Répartition des contraintes radiale, circonférentielle :

Dans cette partie nous allons suivre l'évolution des contraintes radiales et circonférentielles en fonction de la pression interne pour les différentes cas de pipe (sein, corrodé, et réparé).

IV.7. 1.Distribution des contraintes radiale :

Les figures IV.14. IV.15 représentent la contrainte radiale pour un pipe sein pour 2 valeurs de pression 5 et 10 MPa.

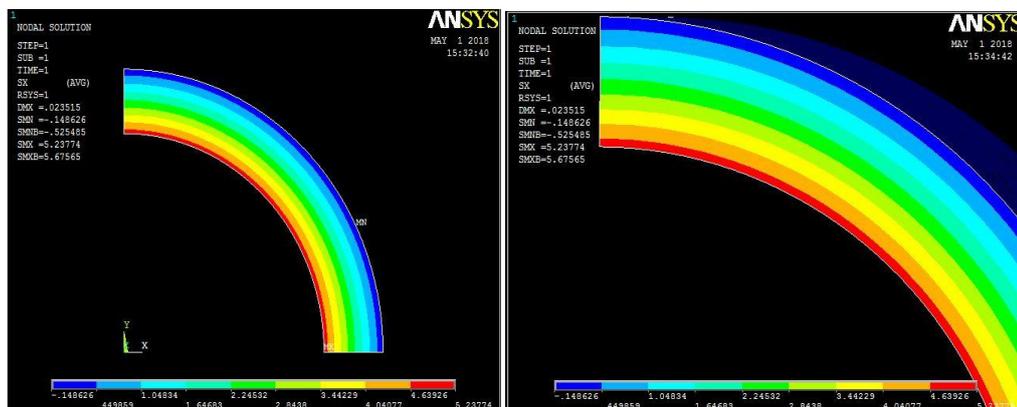


Figure IV.14 : Contrainte radiale du pipe sein pour $p_i = 5$ MPa.

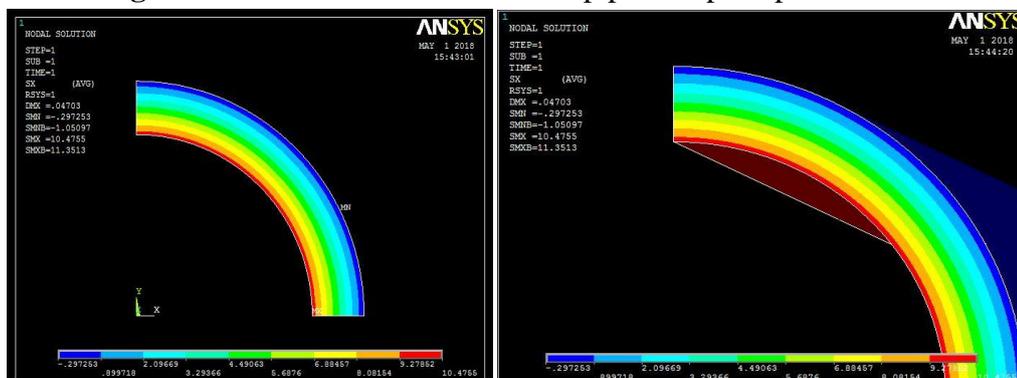


Figure IV.15 : Contrainte radiale du pipe sein pour une pression interne de 10 MPa

La figure IV.14 montre la répartition des contraintes pour un pipe sain, on remarque que la contrainte radiale est répartie uniformément sur la circonférence du pipe, la contrainte maximale a atteint une valeur de $\sigma_{rmax} = 5.237$ MPa situé sur la surface interne, tandis que la valeur minimale $\sigma_{rmin} = 0.148$ MPa est situé sur la surface externe.

La figure IV.15 illustre la contrainte radiale qui est répartie uniformément sur la circonférence du pipe, la contrainte maximale qui égale à $\sigma_{rmax} = 10.475$ MPa situé sur la surface interne et la valeur minimale $\sigma_{rmin} = 0.297$ MPa est situé sur la surface externe.

IV.7. 1.1. Pipe corrodé :

Les figures IV.16 et IV.17 représentent la contrainte radiale d'une pipe corrodée pour les mêmes valeurs de la pression.

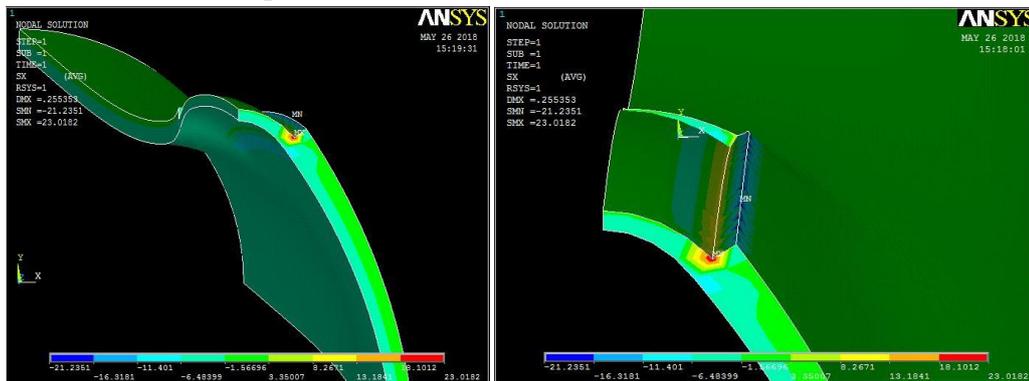


Figure IV.16 : Contrainte radiale pour 5 MPa pipe corrodé.

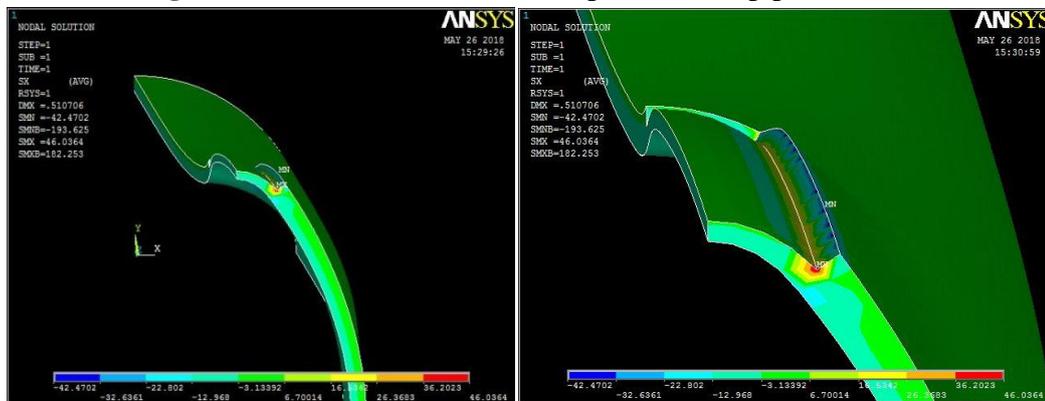


Figure IV.17 : Contrainte radiale pour 10 MPa pipe corrodé

La figure IV.16 montre, que la contrainte maximal radiale du pipe est $\sigma_{rmax} = 22.984$ MPa, alors que la valeur minimale de la contrainte égale à $\sigma_{rmin} = -21.34$ MPa. Tandis que la figure IV.17 montre, que la contrainte maximale radiale du pipe $\sigma_{rmax} = 46.036$ MPa alors que la valeur minimale de la contrainte égale à $\sigma_{rmin} = -42.47$ MPa

IV.7. 1.2. Pipé réparé :

Les figures IV.18 IV.19 représentent la répartition de la contrainte radial pour un pipe réparé avec un patch en composite d'épaisseur 4 mm pour deux valeurs de la pression internes 5 MPa et 10 MPa. La réparation dans ce cas est d'une manière que toutes les

couches du patch sont de même orientation, c'est-à-dire l'angle entre les fibres et l'axe de pipe (l'axe Z) est la même pour toutes les couches, et égale $[0^\circ]$.

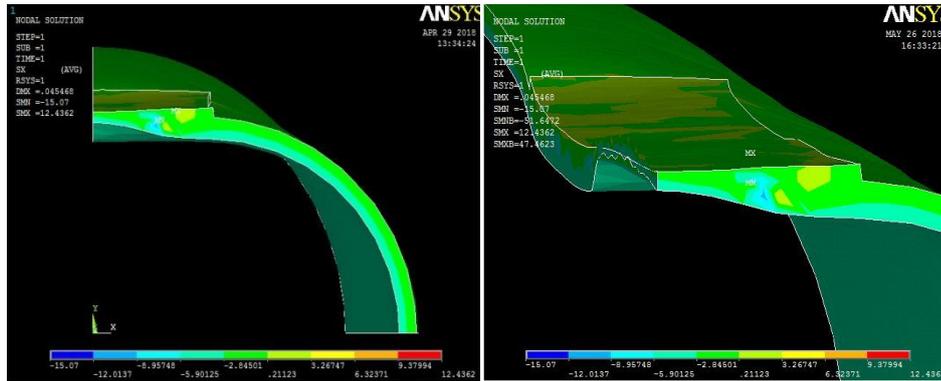


Figure IV.18 : Contrainte radiale pour pipe réparé par patch pour une pression de 5 MPa

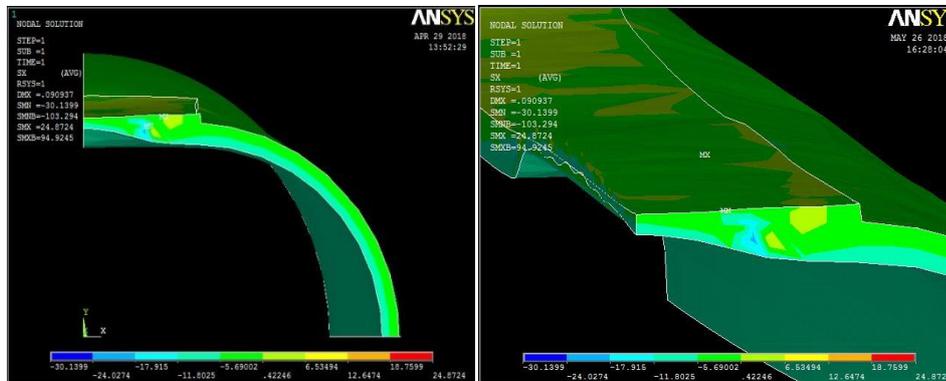


Figure IV.19 : Contrainte radiale pour pipe réparé par patch pour une pression de 10 MPa.

La figure IV.18 montre que la contrainte radiale maximale du pipe vaut $\sigma_{rmax} = 12.46$ MPa par contre la valeur minimale est de $\sigma_{rmin} = -15,07$ MPa.

Sur la figure IV.19, on illustre un pipe réparé au quelle une pression interne de 10 MPa est appliqué, on remarque que la contraint radiale maximale du pipe vaut $\sigma_{rmax} = 24.87$ MPa et la valeur minimale de cette contrainte est égale à $\sigma_{rmin} = -30,1399$ MPa.

Les résultats du comportement de la contrainte radiale en fonction de la pression obtenus par notre simulation pour un pipe sans et avec défaut et après réparation sont montrés dans la figure IV.20.

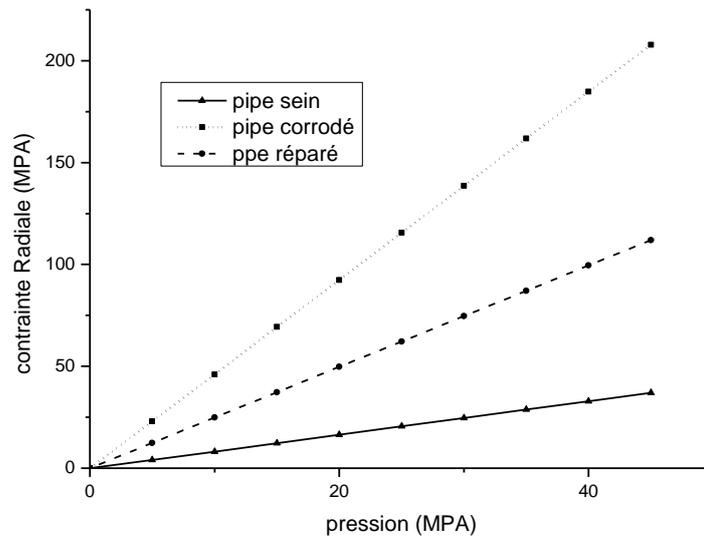


Figure IV.20 : Contrainte radiale en fonction de la pression pour un pipe sans et avec défaut et réparer.

La figure V.20 indique que la contrainte radiale pour un pipe qui comporte un défaut a atteint une valeur maximale $\sigma_{rmax} = 207,811$ MPa pour une pression interne de 45 MPa tandis que la contrainte pour un pipe sans défaut atteint une valeur $\sigma_{rmax} = 37,0397$ MPa pour la même valeur de pression. Après une réparation avec patch en composite d'épaisseur de 4 mm, la contrainte radiale a diminué jusqu'à 111.926 MPa.

IV.7. 2.la contrainte circonférentielle :

Les figures IV.21 et IV.22 représentent la contrainte circonférentielle pour un pipe sein pour 2 valeurs de pression 5 et 10 MPa.

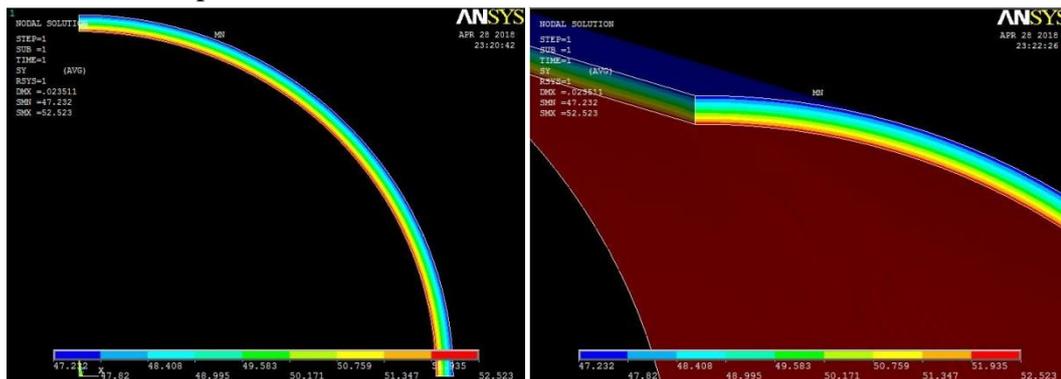


Figure IV.21 : Contrainte circonférentielle pour pipe sein avec une pression interne de 5 MPa.

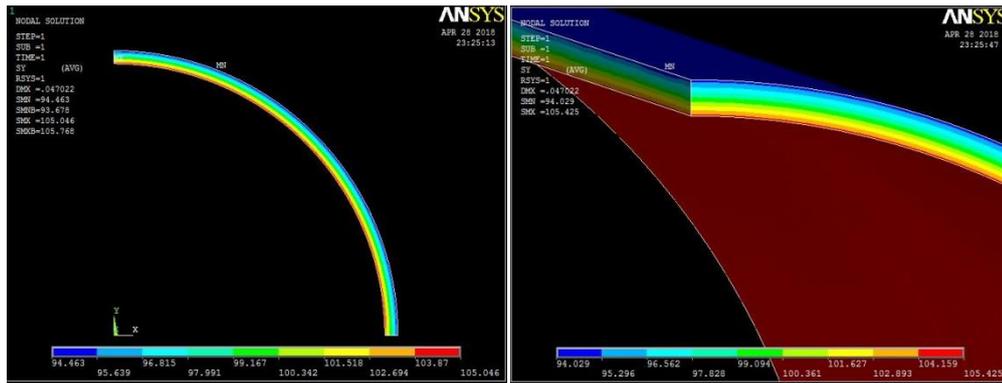


Figure IV.22 : Contrainte circonférentielle pour 10 MPa pipe sein.

La figure IV.21 montre que la contrainte circonférentielle du pipe $\sigma_{\theta_{max}} = 52.523$ situé sur la surface interne tandis que la valeur minimale de la contrainte égale à $\sigma_{\theta_{min}} = 47.232$ situé sur la surface externe.

La figure IV.22 présente une pression de 10 MPa appliqué sur un pipe sein, on remarque que la contrainte circonférentielle de pipe $\sigma_{\theta_{max}} = 105.425$ MPa et la valeur minimale de la contrainte égale à $\sigma_{\theta_{emin}} = 94.029$ MPa

IV.7. 2.1. pipe avec défaut rectangulaire :

Les figures IV.23 et IV.24 représentent la contrainte circonférentielle pour un pipe corrodé pour les mêmes valeurs de pression.

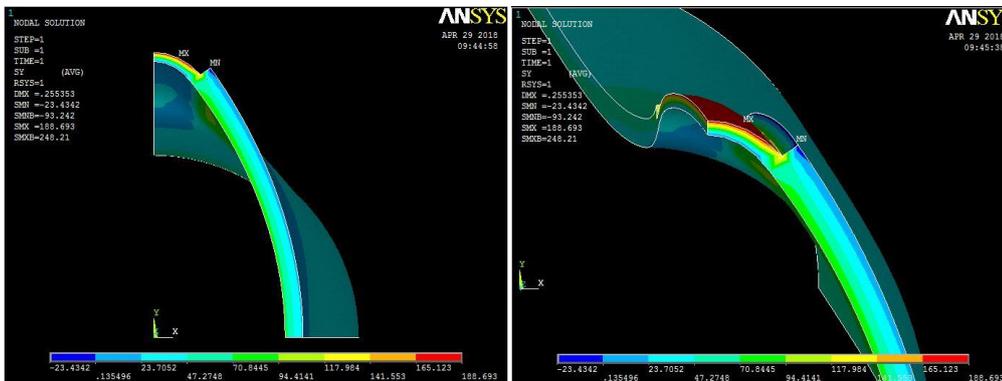


Figure IV.23 : Contrainte circonférentielle pour 5 MPa pipe corrodé

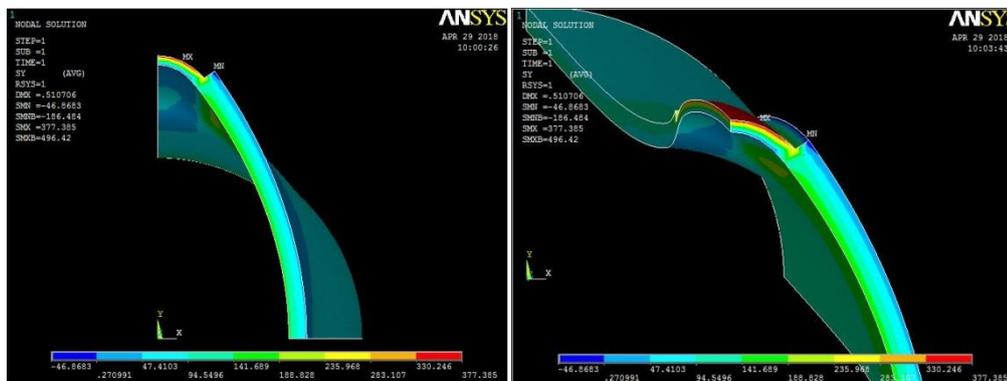


Figure IV.24 : Contrainte circonférentielle pour 10MPa pipe corrodé.

La figure IV.23 montre que la contrainte maximale est située sous la zone corrodée présentée en rouge, sa valeur est $\sigma_{\theta_{max}} = 188.639$ MPa. La valeur minimale $\sigma_{\theta_{min}} = 23.4342$ MPa sur le reste de la surface du pipe.

La figure IV.24 montre que la contrainte maximale égale $\sigma_{\theta_{max}} = 377.385$ MPa et la valeur minimale $\sigma_{\theta_{min}} = 46.86$ MPa.

Les contraintes circonférentielles sont réparties non-uniformément sur le tube corrodé, et la contrainte maximale est situé au défaut, on dit alors que la contrainte est concentré sur la zone corrodé (façade supérieure) ce qui va provoquer une défaillance (déformation puis éclatement) avec l'augmentation de pression.

IV.7. 2.2. Pipe réparé :

Les figures IV.25 IV.26 représentent la répartition de la contrainte circonférentielle pour un pipe réparé avec un patch en composite d'épaisseur de 4 mm deux valeurs de pression 5 MPa et 10 MPa.

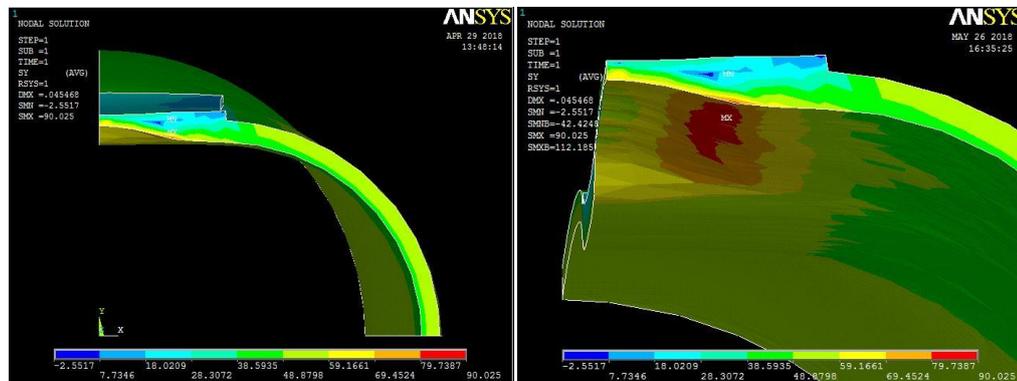


Figure IV.25 : Contrainte circonférentielle pour un pipe réparé par patch suivant une orientation d'angle de $[0^\circ$ axiale] pour une pression de 5 MPa

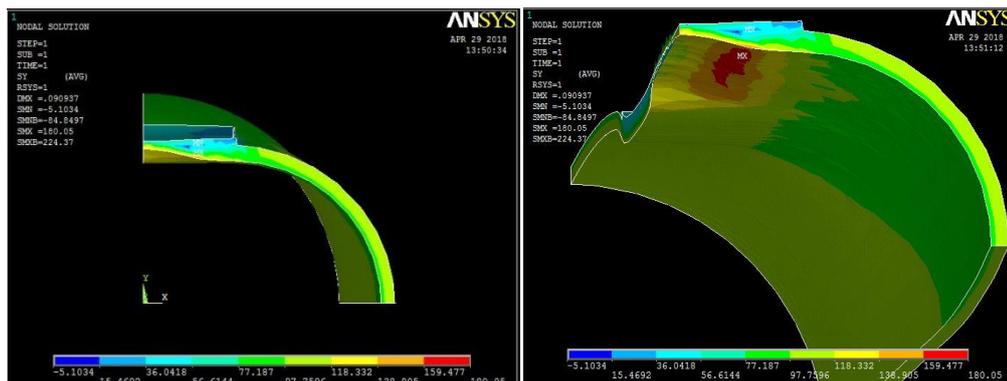


Figure IV.26 : Contrainte circonférentielle pour un pipe réparé par patch suivant une orientation d'angle de $[0^\circ$ axiale] pour une pression de 10MPa

On constate sur la figure IV.25, que la contrainte circonférentielle est maximale avec une valeur de $\sigma_{\theta_{max}} = 90.025$ MPa concentrée au-dessous de la zone réparé comme c'est montré en rouge, et la contrainte minimale est égale à $\sigma_{\theta_{min}} = 2.551$ MPa. Tandis que sur la figure IV.26, on remarque que la contrainte maximale vaut $\sigma_{\theta_{max}} = 180.05$

MPa concentrée au-dessous de la zone réparé (zone rouge), et la contrainte minimale égale à $\sigma_{\theta_{\min}} = 5.108$ MPa.

Les résultats de la contrainte circonférentielle en fonction de la pression obtenus par notre simulation pour un pipe sans et avec défaut et après réparation en fonction de la pression interne sont montrés dans la figure IV.27.

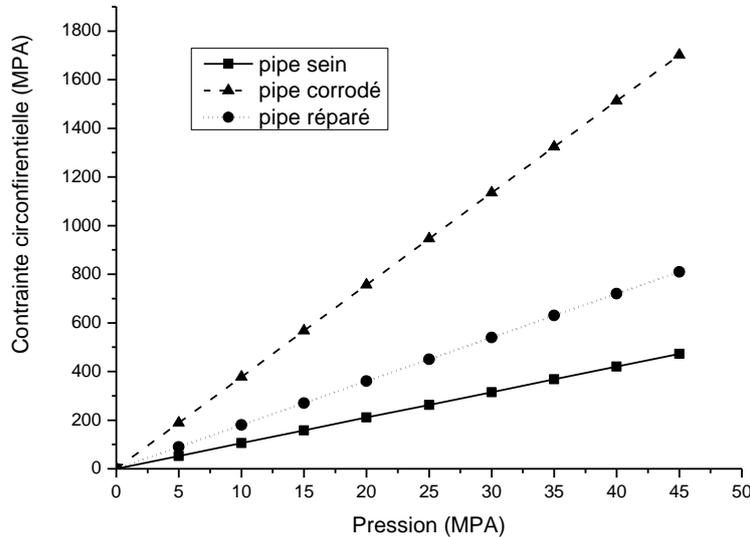


Figure IV.27 : Contrainte circonférentielle en fonction de la pression pour pipe sans et avec défaut et réparer.

On remarque que la contrainte circonférentielle pour un pipe qui comporte un défaut a atteint une valeur maximale $\sigma_{\theta_{\max}} = 1701,74$ MPa qui a dépassé la limite d'élasticité pour l'acier API 5L X60 et la résistance à la rupture pour une pression interne $P_i = 45$ MPa, pendant que, la contrainte du pipe sans défaut atteint une valeur maximale de $\sigma_{\theta_{\max}} = 472,706$ MPa . Après une réparation avec patch en composite d'épaisseur de 4 mm la contrainte circonférentielle a diminué jusqu'à 810,225 MPa.

IV.8.Effet de l'angle d'orientation de fibre sur la réparation par patch

La partie suivante est consacrée à l'effet de l'orientation des fibres du matériau composite sur l'efficacité de la réparation. On a varié la pression interne pour différents angles d'orientations des fibres. Les figures IV.28 IV.29 montrent la variation de la contrainte circonférentielle et radiale en fonction de la pression interne pour un pipe réparé par patch avec une épaisseur de 4 mm suivant 3 angles différents d'orientation des fibres à savoir $[0^\circ \text{ axiale}]$, $[0^\circ/90^\circ]$ et $[0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ respectivement.

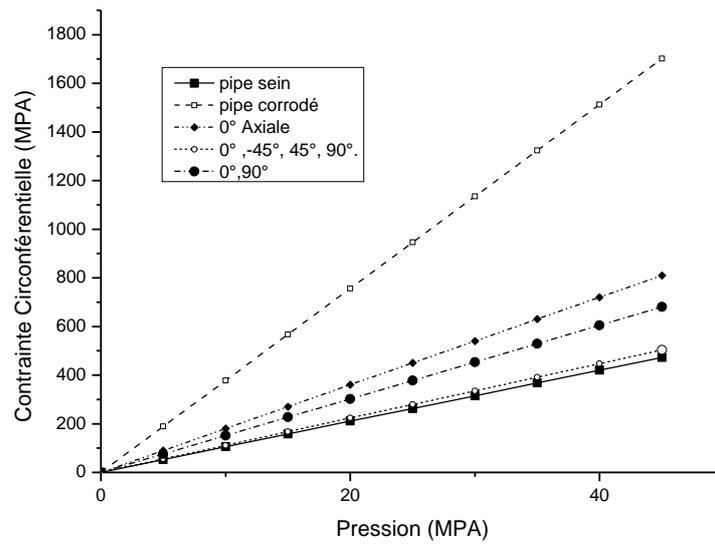


Figure IV.28 : Contrainte circonférentielle en fonction de la pression pour 3 angles d'orientation de fibre.

La figure IV.28 montre que l'orientation de fibre suivant le angle $[0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ permet d'obtenir un meilleur résultat par rapport aux autre orientations, et la valeur de contrainte circonférentielle obtenues est presque similaire à celle d'un pipe sans défaut.

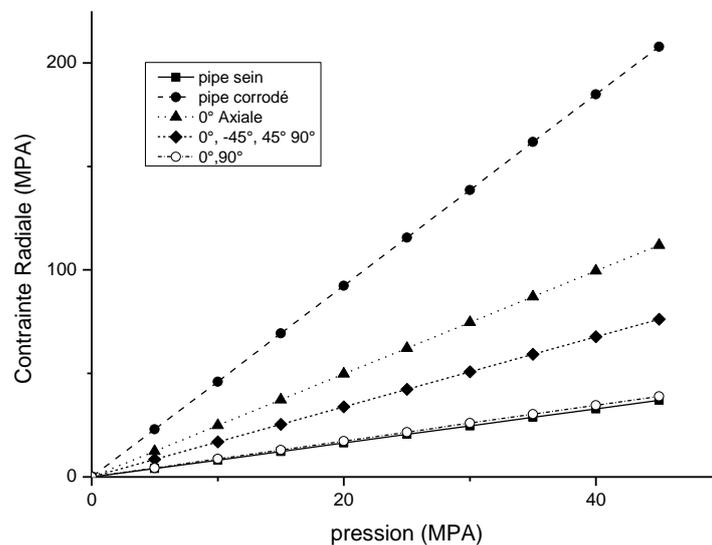


Figure IV.29 : Contrainte radiale en fonction de la pression pour 3 angles d'orientation de fibre.

Il est claire que la contrainte radiale a diminué largement après la réparation par patch en composite. On peut aussi noter que l'orientation des fibres lors de la réparation joue un rôle très important. La figure IV.29 montre que l'orientation des fibres suivant l'angle $[0^\circ/90^\circ]$ permet d'obtenir un meilleur résultat par rapport aux autre orientations,

et la valeur de contrainte obtenues est presque similaire à la contrainte radiale d'un pipe sans défaut.

IV.9. Effet de l'épaisseur de patch sur la réparation

Dans le but d'une meilleure réparation et après la variation des angles d'orientation, on a pris la meilleur séquence d'orientation des fibres à savoir l'angles $[0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ]$. Avec ce cas de figure, on faire varié l'épaisseur du patch de réparation de 4 à 8 mm. Les figure IV.30 IV.31 montre le comportement de la contrainte circonférentielle radiale et en fonction de la pression pour un pipe réparé par patch avec trois épaisseurs différentes.

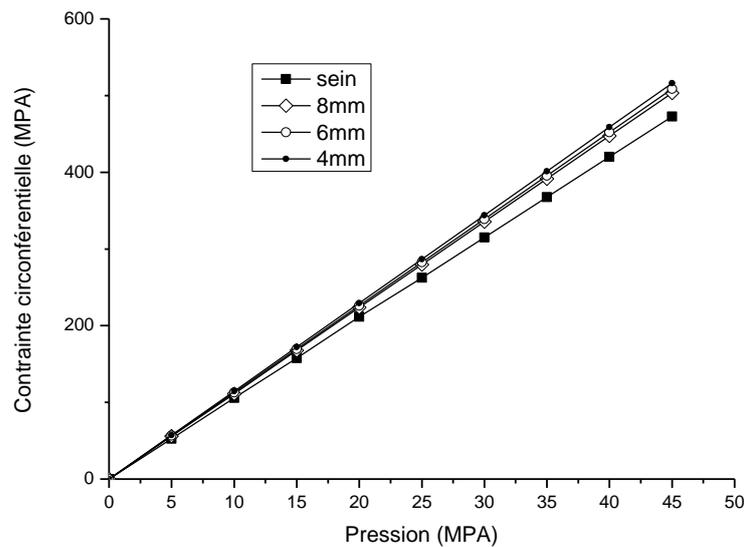


Figure IV.30 : Contrainte circonférentielle en fonction de la pression pour 3 valeurs d'épaisseur différentes.

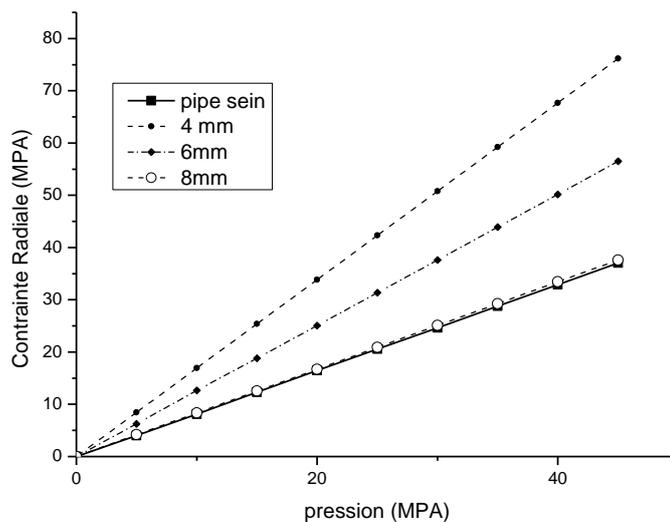


Figure IV.31 : Contrainte radiale en fonction de la pression pour 3 valeurs d'épaisseur différentes.

On remarque sur la figure IV.30 indique que la contrainte circonférentielle a diminué de 516 MPa jusqu'à 503 MPa au fur et à mesure que l'épaisseur augmente de 4 mm à 8 mm. Tandis que les résultats constatés sur la figure IV.31 montrent que l'épaisseur du patch joue un rôle très important, on remarque que la contrainte radiale a diminué de 76 MPa jusqu'à 38 MPa par rapport à l'augmentation de l'épaisseur qui croît de 4 mm à 8 mm.

IV.10. Effet de choix de matériaux de réparation

Après avoir vu l'effet des orientations des angles et l'épaisseur de patch en gardant les meilleurs résultats des cas précédents et en variant cette fois-ci le matériau composite, on a choisi les patches verre/époxy et aramide/époxy pour voir l'effet du matériau utilisé. Les caractéristiques mécaniques de verre et d'aramide sont présentées dans le tableau IV.2

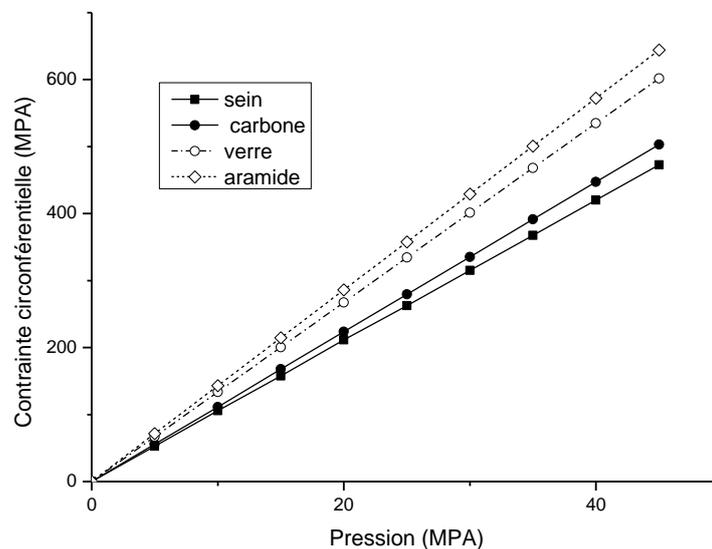


Figure IV.32 : Contrainte circonférentielle pour trois matériaux composites carbone-verre-aramide.

Dans cette partie, on veut montrer l'importance du choix du type de matériaux. Ainsi, les résultats obtenus dans la figure IV.32 montrent que la contrainte circonférentielle pour l'aramide et le verre est supérieure à celle du carbone avec une valeur maximale de 644 MPa pour l'aramide et 601.8 MPa pour le verre pour une pression interne de $P_i = 45$ MPa. Par conséquent, on déduit que le carbone est plus efficace par rapport aux autres matériaux.

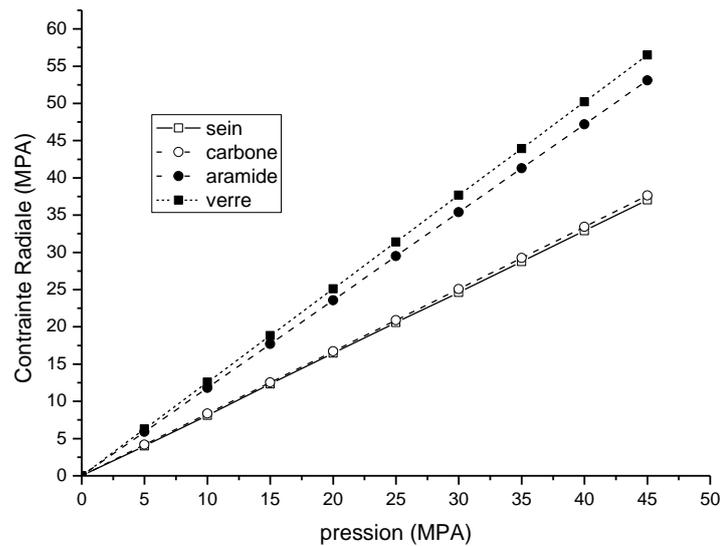


Figure IV.33 : Contrainte radiale pour trois matériaux composites carbone-verre-aramide.

Dans la figure IV.33, on a voulu observer la même chose à savoir l'effet du changement du matériau mais cette fois sur le comportement de la contrainte radiale. On voit que la valeur de cette contrainte pour l'aramide et le verre est supérieur de celle de carbone et elle atteint une valeur de 53 MPa pour l'aramide et 56.5 MPa pour le verre pour une pression interne de $P_i = 45$ MPa. Alors on conclut que la réparation avec le patch en carbon/epoxy est plus efficace par rapport aux autres matériaux.

IV.11. Conclusion

L'étude de simulation numérique de la structure métallique de pipeline a comportée trois parties :

- Une étude numérique d'une pipe en acier sans défaut.
- Une étude numérique d'une pipe comportant un défaut de corrosion rectangulaire.
- Une étude numérique d'un pipe corrodé renforcé par un patch de composite types carbon-epoxy, verre-époxy et aramide-époxy.

Nous avons considéré dans un premier temps une pipeline sans défaut en faisant varier la pression intérieure, dans un deuxième temps le pipeline comportant un défaut de corrosion sous forme de rectangulaire et nous avons terminer cette simulation par la réparation de cet dernier par patche en composite en faisant varier l'angle d'orientation des couches de fibre de carbone, l'épaisseur de patch de composite et le type de matériau composite. L'étude de simulation a montré que la structure renfermant des défauts est caractérisée par une concentration de contraintes à l'endroit du défaut qui peuvent engendrer une propagation de cette anomalie et la détérioration de la structure, ce qui nécessite une réparation de la structure.

Chapitre IV : simulation numérique et discussion des résultats

Les résultats obtenus ont montrés que la contrainte radiale et circonférentielle pour un pipe réparé par patch à base de matériau composite atteint presque la même valeur qu'un pipe sans défaut.

Conclusion générale

L'étude menée consiste à faire une simulation numérique afin de déduire les contraintes radiales et circonférentielles subies par un pipe dans trois cas distincts qui sont un pipe sain, un pipe présentant un défaut de corrosion de forme rectangulaire et en fin un pipe réparé par collage de patch à base de matériaux composites.

Et dans le but d'étudier la déformation d'un pipe dans deux cas distincts qui sont un pipe sain et un autre corrodé on varie la pression interne jusqu'à 40 mPa pour buter de suivre l'évolution de déformation. Ce résultat, nous a permis de faire une comparaison avec le travail de Chan [31] qui nous a permis de réaliser une validation.

Les résultats ont montré que les contraintes radiales et circonférentielles pour la structure qui comprend un défaut est très élevée par rapport aux résultats d'un pipe sain ce qui nécessite une réparation.

La technique de réparation avec un patch en composite a fait ses preuves dans le renforcement des pipes en présence de défauts de corrosion. Les analyses numériques ont montré que cette technique de consolidation confère au pipe sa résistance initiale. Selon les résultats, une décroissance presque linéaire de la contrainte radiale et circonférentielle est observée après la réparation, ce qui montre son efficacité pour la réparation des structures métalliques.

On a remarqué une réduction très accentuée des contraintes radiale et circonférentielle pour la variation des angles d'orientation du patch, ce qui montre son effet sur l'efficacité de la réparation.

On a remarqué une réduction très accentuée des contraintes radiale et circonférentielle pour une variation d'épaisseur du patch, ce qui montre l'influence d'épaisseur de patch sur la réparation.

L'application des différents types de matériaux composites constituant le patch de réparation (carbone- fibre de verre et les fibres d'aramides) révèle que les niveaux de contraintes radiales et circonférentielles sont réduites, et selon les résultats la réparation par patch en carbone est plus efficace par rapport aux autres matériaux.

En perspectives, il serait souhaitable d'appliquer cette méthode de réparation en recherchant les matériaux composites adéquats autres que ce qu'on a utilisé, afin de minimiser l'épaisseur de patch où l'assemblage collé serait plus résistant.

Pour un certain niveau de contraintes au delà de la limite élastique, il est préférable d'effectuer une analyse non-linéaire en vue de suivre l'évolution du comportement élastoplastique du matériau du pipe en termes de déformations .

Il est souhaitable de faire une étude sur la tenue de la pipe en présence de défauts de géométries complexes.

Il est aussi souhaitable d'étudier La variation des contraintes circonférentielles et radiales par rapport à l'épaisseur de pipe et de patch ainsi Chercher un angle optimal qui va nous permettre de réduire ces contraintes.

Chercher des méthodes de résoudre notre problème tel que les méthodes analytiques.

Dédicaces :

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci beaucoup mes parents.

A toutes personnes qui ma aider à poursuivre mes études.

*A mes frère **Brahim**, **Younes** et mes sœurs.*

*A toute La famille, **Elouedj** et la famille **Habri**.*

*A tous mes amis : **Kadda**, **Redouane**, **Ali**.*

Mes collègues de master en Maintenance en Electromécanique

Azzeddine.

Dédicaces :

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci beaucoup mes parents.

A toutes personnes qui ma aider à poursuivre mes études.

*A mes frère **Arbi, Tahar** et ma sœur **Dahbia**.*

A toute La famille Boussag et la famille Amirouche.

Mes collègues de Master en maintenance en électromécanique.

Kouider.

I Introduction générale

Une canalisation, ou un pipeline (en anglais) est une conduite destinée à l'acheminement de matières gazeuses, liquides, solides ou polyphasiques, d'un endroit à un autre.

Ces derniers sont 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 sont la cause principale de fuites et de ruptures des canalisations, se traduisant parfois par des dégâts catastrophiques (dégâts humains, pollution du milieu naturel, frais supplémentaires de réparation, arrêt prolongé du pompage, etc..)

Et pour cela la maintenance des pipelines consiste à les protéger en limitant les défaillances tel que la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance due aux pics de corrosion et à les renforcer en améliorant leur performances et leur durabilité.

Parmi les techniques de réparation des pipelines endommagés est la réparation des structures métalliques par renforcement d'un matériau composite. Depuis une dizaine d'année, une alternative est proposée, il s'agit de renforcer ou de réparer les structures métalliques par des matériaux composites à matrice polymère collés extérieurement sur des structures défectueux ou dégradées. Les matériaux composites, en particulier à base de fibres de carbone ou de verre, de par leur rigidité spécifique, présentent un grand intérêt pour la réparation. De plus, malgré leur prix élevé, ils présentent un avantage économique car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures pendant l'exploitation. Ceci permet de réduire considérablement les coûts de maintenance.

Le confinement des structures métalliques se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ces enveloppes appliquées aux ouvrages améliorent le confinement du métal, ainsi que sa ductilité et sa résistance. Les différents composites offrent des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du métal confiné.

L'objectif de notre travail est de montrer l'efficacité de la réparation par collage de matériaux composites à l'aide d'une modélisation numérique du comportement de la structure sans défaut, avec défaut et avec défaut réparé.

Le mémoire sera présenté en quatre chapitres. Dans Le premier chapitre, nous présenterons dans un premier temps les pipelines et leur importance économique dans le monde. Ensuite les caractéristiques chimiques et mécaniques des pipelines et les méthodes de fabrication des tubes et finalement les principales causes de la dégradation des caractéristiques mécaniques des pipelines enfin les méthodes des réparations des pipelines.

Le deuxième chapitre présentera une introduction sur les matériaux composites et leurs principales propriétés ainsi les méthodes de réparation par matériaux composites.

Le troisième chapitre s'articulera autour de deux parties distinctes. La première partie comporte une recherche bibliographique sur les défauts des pipelines et la réparation par patch en composites. La deuxième partie est une simulation numérique de l'état des contraintes d'un tube sans défaut en fonction de leur épaisseur et leur pression interne, ensuite on détermine l'ensemble des lois expérimentales qui permet de calculer la pression critique pour une pipe corrodée.

Le quatrième chapitre comporte dans la première partie une modélisation numérique par la méthode des éléments finis du comportement de la structure sans défaut, avec défaut et un pipe réparé avec collage de patch en composite. La deuxième partie de ce chapitre sera consacré aux discussions des résultats obtenus par la modélisation numérique.

Nous terminerons le mémoire par une conclusion générale.

Listes des figures et tableaux :

Figure I.1 : acheminement d'un pipeline
Figure I.2 : Caractéristiques des tubes
Figure I.3 : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale
Figure I.4 : L'angle d'introduction de la bande
Figure I.5 : mise en forme des tubes par le procédé –UOE-
Figure I.6 : fabrication de pipe sans soudure.
Figure I.7 : Organigramme présente les grandes catégories d'endommagement
Figure I.8 : Fissure préexistante dans le joint circulaire
Figure I.9 : Corrosion dans la pipe
Figure I.10 : détection de défaut par le contrôle par ultrasons
Figure I.11 : Piston instrumenté basé sur le principe de perte de flux magnétique
Figure I.12 : Réparation de surface pour réfection enrobage
Figure I.13 : Changement du tronçon endommagé d'une canalisation, (a).découpage, (b).ré-soudage

Figure III.1 : la profondeur de défaut de corrosion (mm)
Figure III.2 : épaisseur de réparation de patch requise pour différents niveaux de défauts
Figure III.3 : relation de charge et de contrainte du faisceau avec un défaut de fissure
Figure III.4 : probabilité d'endommagement pour l'épaisseur de la paroi du pipeline comme variable aléatoire et sa réduction globale du temps due à une corrosion externe uniforme
Figure III.5 : facteur de sécurité (fs) par rapport à la pression appliquée pour les trois zones de fissures
Figure III.6 : déplacement de défaut ultime normalisé pour divers critères de performance et valeurs différentes de épaisseur de préparation de prfc ($d/t=96$, $p=56$ pmax)
Figure III.7 : contrainte vs contrainte à différentes températures
Figure III.8 : comparaison entre les pressions prévues et expérimentales pour différents critères (en MPA)
Figure III.9 : effet de la corrosion active sur l'indice de fiabilité du pipeline
Figure III.10 : courbe de charge-déformation d'un pipe saine, corrodé et corrodés réparé avec différentes orientation des fibres (carbone/pré-imprégnation époxy)
Figure III.11 : la pression d'éclatement du tube API 5L-X70 avec différentes profondeurs et longueurs de défauts
Figure III.12 : déformation circonférentielle en fonction de la pression interne appliquée aux systèmes de réparation
Figure III.13 : variation de pression pendant l'essai d'éclatement pour diverses corrosions profondeurs
Figure III.14 : comportement d'un acier au carbone
Figure III.15 : représentation de la fissure sur un tube

Figure III.16 : les différents outils et codes utilisés pour l'évaluation des pipelines à défauts ainsi que leurs développements avec le temps

Figure III.17 : défaut de corrosion court projeté selon une forme parabolique

Figure III.18 : défaut de corrosion long projeté selon une forme rectangulaire

Figure III.19 : face longitudinale imaginaire d'un défaut de corrosion

Figure III.20 : surface corrodée parabolique assumée pour le défaut relativement court de corrosion (selon ASME B31G)

Figure III.21 : secteur rectangulaire supposé corroder pour un plus long défaut de corrosion (selon ASME B31G)

Figure IV.1 : le modèle géométrique du pipe

Figure IV.2 : Géométrie de SOLIDE 186

Figure IV.3 : Maillage titra hydrique d'une pipe sans défaut.

Figure IV.4 : Conditions aux limites

Figure IV.5 : Géométrie d'une pipe avec défaut.

Figure IV.6 : Maillage d'un tube avec défaut.

Figure IV.17 : Contrainte Radiale pour 10 MPa pipe corrodé

Figure IV.18 : Contrainte radiale pour pipe réparé par patch suivant une orientation d'angle de $[0^\circ \text{ axiale}]$ pour une pression de 5 MPa

Figure IV.19 : Contrainte radiale pour pipe réparé par patch suivant une orientation d'angle de $[0^\circ \text{ axiale}]$ pour une pression de 10MPa

Figure IV.20 : Contrainte Radiale en fonction de la pression pour pipe sans et avec défaut et réparer

Figure IV.21 : Contrainte circonférentielle pour 5 MPa pipe sein

Figure IV.22 : Contrainte circonférentielle pour 10 MPa pipe sein

Figure IV.23 : Contrainte circonférentielle pour 5 MPa pipe corrodé

Figure IV.24 : Contrainte circonférentielle pour 10 MPa pipe corrodé

Figure IV.25 : Contrainte circonférentielle pour un pipe réparé par patch suivant une orientation d'angle de $[0^\circ \text{ axiale}]$ pour une pression de 5 MPa

Figure IV.26 : Contrainte circonférentielle pour un pipe réparé par patch suivant une orientation d'angle de $[0^\circ \text{ axiale}]$ pour une pression de 10MPa

Figure IV.27 : Contrainte circonférentielle en fonction de la pression pour pipe sans et avec défaut et réparer.

Figure IV.28 : Contrainte circonférentielle en fonction de la pression pour 3 angles d'orientation de fibre

Figure IV.29 : Contrainte Radiale en fonction de la pression pour 3 angles d'orientation de fibre.

Figure IV.30 : Contrainte Radiale en fonction de la pression pour 3 valeurs d'épaisseur différentes.

Figure IV.32 : Contrainte circonférentielle pour trois matériaux composites carbone-verre-aramide

Figure IV.33 : Contrainte radiale pour trois matériaux composites carbone-verre-aramide

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Caractéristique mécanique par (N/mm²) (Tubes de conduite PSL 1)

Tableau I.2 : Caractéristique mécanique de l'acier X65 selon la norme API

Tableau II.1 : Récapitulatif sur les propriétés des fibres. [10]

Tableau IV.1 : Propriété mécanique de l'acier API 5L X60

Tableau IV.2 : Propriété mécanique de composite (Carbon/verre/époxy)

Tableau IV.3 : l'erreur relative G

Notation et symbols

Notation	Définition
B	la largeur de la bande.
D _{ext}	Le diamètre extérieur de tube formé.
B	L'angle d'introduction de la bande par rapport au l'axe symétrique (Δ).
t	L'épaisseur nominale de la paroi de tube.
L _d	Longueur axiale de défaut
L _t	Longueur conique de défaut (largeur)
E	Module de Young
ε	Déformation
α	Coefficient de sécurité.
n	Coefficient de durcissement
σ_y	Contrainte à la rupture de l'acier de la pipe selon ASME PCC-2
SMYS	La limite d'élasticité spécifique minimale pour ASME PCC-2
E _s	Module de traction axiale de la pipe selon ASME PCC-2
E _c	Module de traction axiale de la couche de composite selon ASME PCC-2
P _s	Pression maximale admissible de la pipe avec défaut selon ASME PCC-2
F	La charge axiale résultante due à la flexion selon ASME PCC-2
σ_{rr}	La contrainte à la traction
$\sigma_{\theta\theta}$	La contrainte circonférentiel
σ_{zz}	La contrainte radiale
σ_e	La contrainte de Von mises
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$	déformations normales
γ_{xy}, γ_{xz} et γ_{yz}	déformations de cisaillement
δ_{ij}	l'indice de Kronecker
R _c	contrainte d'écoulement
a	la profondeur du défaut
2c	l'extension maximale longitudinale de la corrosion
P _{ult}	La pression ultime
f	facteur de conception
T	la température sous sollicitant
M	Le coefficient de flambage
A	la surface de défaut
R _m	la limite d'écoulement
t _{min}	l'épaisseur minimale nécessaire pour la réparation
L	la longueur de réparation
σ_{SMYS}	limite d'élasticité spécifiée
Q	Facteur de correction
α	Est Ramberg-Osgood constants
η	Est un indice de durcissement utilisé pour obtenir l'ajustement de la courbe et caractérisant le degré de durcissement de la courbe
R _e	Limite d'élasticité
A _c	La surface corrodée
A _{pc}	La surface de défaut

LISTE DES ABRÉVIATIONS

HSLA : Haigh Strength Low Alloy Steels

FBE : Fusion-Bonded Epoxy

CND : Contrôle Non Destructif

PRF : polymère renforcé de fibres

ASME: American Society of Mechanical Engineers, Etats-Unis.

ANSI : American National Standards Institute, Etats-Unis.

DNV : DetNorskeVeritas, Fondation autonome et indépendante.

RSTRENG : Code pour évaluer la rupture des pipelines corrodés extérieurement, Etats-Unis.

API : American Petroleum Institute, Etats-Unis.

PDAM : Pipeline Defect Assessment Manual, Grande Bretagne

M.E.F (FEM) : Méthode des éléments finis



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

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique Industrielle

Thème

Optimisation et Réparation D'un Pipe en Acier par Matériaux Composites

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom...Elouedj Boukraled.....Prénom...Azzeddine.....

Nom...BoussagPrénom...Kouider.....

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BOUHAMRI Nouredine	...MAA....	UNIV.D'ORAN 2	Président
BOUHAFS Mohamed.....	...MCB....	UNIV.D'ORAN 2	Encadreur
MEGHDIR AbedMAA....	UNIV.D'ORAN 2	Examineur

Juin 2018

Référence bibliographiques

- [1] : I. djedid, «Etude sur les défaillances des aciers Api- 51x60 pour pipeline cas de la ligne Gz1», mémoire Master, université de tlemcen 2013.
- [2] : A.W.gertner, M.K graf. et H.G. A hillenbrand., «Producer's view of large diameter line pipe in the next decade in the international conference on pipeline reliability», 1992.
- [3] : A. benhamouda, «Etude du comportement des fissures dans les tubes sous pression interne», mémoire De Magistère, génie mécanique option : mécanique des surfaces et matériaux, université Mentouri constantine, 2010.
- [4] : A. bouziane, « Contribution a la détermination des critères des qualités des tubes soudés soumis a une pression intérieure ». thèse de magistère en génie mécanique, université M'hamed Bougara boumerdes, 2007/2008.
- [5] : H. neuber. «Theory of notch stresses», Lichigan, 1964.
- [6] : Gas pipeline incidents -9th report of the european gas pipeline incident data group, 1970 – 2013.
- [7] : A. mechernene, «Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines», 2013.
- [8] : M. ramdani, « Etude mécano-fiabiliste sur le comportement en corrosion localisée des aciers Api-51-X60 pour pipeline », Magister université tlemcen, 2008.
- [9] : «Soudage des canalisations et Installation connexes, segment canalisation», norme api 1104, deuxième édition, septembre 1999.
- [10] : M.nateche, «Réhabilitation et renforcement des canalisations sous pression en présence des défauts de surfaces», thèse université d'oran.
- [11] : Noëlle Mercier,«contrôle non destructif de matériaux par ultrasons» .Note Technique N° 232 (1974).
- [12] : J.W. hutchinson, «Singular behavior at the end of a tensile crack in a hardening material», Phys. solids pergamon press.Vol. 16. pp. 13-31. 1968.
- [13] : Belhenini & benkeltoum, «Analyse numérique des contraintes dans les pipes non conventionnels en composite», Master université d'usto 2013.
- [14] :M.ahmed, B.soufyane «Simulation numérique de comportement mécanique d'un pipeline en composite sous chargement» mémoire master, IMSI université d'oran 2 , juin 2017.
- [15] : Md. shamsuddoha, «Effectiveness of using fiber-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs».
- [16] : L. gornet, « Généralités sur les matériaux composites », Engineering School, 2008.
- [17] : A.E. merdas, «utilisation de TFC dans la réparation e le renforcement des poutres en BA», Magister université des frères Mentouri-Constantine 2005.
- [18] : J-M. berthelot, «Matériaux composite comportement mécanique et analyse des structures », 4ème édition LA VOISIER 2005.
- [19] : N. bahloul, « cour matériaux composites DESS mécanique avancée et stratégie industrielle».
- [20] : Frani & Safia «Etude de comportement mécanique d'un pipeline endommagé réparé par un matériau composite », master institut de maintenance 2017.
- [21] : R. ochola, «Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates», composite stricter, 2004.

- [22] : S. rukke, «Pipeline repair using clock spring, composite sleeve reinforcement, washington utilities, transportation commission».
- [23] : C. I. ossai, B. boswell and I. J. davies, “Stochastic modelling of perfect inspection and repair actions for leak-failures prone internal corroded pipelines”, eng. failure anal.
- [24] : A. manalo, «Pre-impregnated carbon fibre reinforced composite system for patch repair of steel I-beams».
- [25] : M. witek, « Gas Transmission pipeline failure probability estimation and defect repairs activities based on in-line inspection data », engineering failure analysis, 5 September 2016.
- [26] : S.A. timashev, «Markov description of corrosion defects growth and its application to reliability based inspection and maintenance of pipelines», January 2008.
- [27] : M. Mokhtari, « Using frp wraps to reinforce buried steel pipelines subjected to permanent ground deformations: a feasibility study», September 2014.
- [28] : L. mackmillan paim, «Analysis of a glass fiber reinforced polyurethane composite repair system for corroded pipelines at elevated temperatures», April 18-19 2013.
- [29] : H.S. da costa mattos, «Failure analysis of corroded pipelines reinforced with composite repair systems», December 2015.
- [30] : R. khelif, « Effet de la corrosion et des contraintes résiduelles sur la fiabilité des pipelines », 12ème congrès de mécanique 21-24 avril 2015 casablanca (Maroc).
- [31] : Chan, « The flexural properties of composite repaired pipeline: numerical simulation and experimental validation », composite structures 133 (2015) 312–321. 23 July 2015.
- [32] : K. J. Yeom, «Integrity assessment of a corroded Api X70 pipe with a single defect by burst pressure analysis».
- [33] : Md. shamsuddoha, «Effectiveness of using fibre-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs».
- [34] : J.B. Choi, « Development of limit load solutions for corroded gas pipelines».
- [35] : S.A. belhenini et K. benkaltoum, «Analyse numérique des contraintes dans les pipes non conventionnels en composite», université d’usto 2013.
- [36] : K.A. macdonald and A. Cosham, « Best practice for the assessment of defects in pipelines – gouges and dents», engineering failure analysis vol.12, 720–745, 2005.
- [37] : A. A. griffith, Phil Trans. Roy. Soc. london, A.221, Pp163-198, 1920.
- [38] : J. F. kiefner, W. A. maxey, R. J. eiber, A.R. duffy, « Failure stress loads of flaws in pressurised cylinders», astm stp Vol. 536. Philadelphia, P. 461–81, 1973.
- [39] : Asme B31g-1991, « Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines», the american society of mechanical engineers, New York, Usa, 1991.
- [40] : A. Cosham, P. Hopkins, «The pipeline defect assessment manual», international pipeline conference, calgary, Alberta, Canada, 2002.
- [41] : M.Fekih, « Etude sur la méthode de réparation des ouvrages métalliques par collage de matériau composite cas de la ligne de pipeline Gz1 40"», thèse de doctorat.
- [42] : Asme Pcc-2:2008. « Repair of pressure equipment and piping».
- [43] : A.Cosham, P. Hopkins, « The pipeline defect assessment manual», International pipeline conference, Calgary, Alberta, Canada, 2002.
- [44] : Benziane, «Finite element analysis of the integrity of an Api X65 pipeline with a longitudinal crack repaired with single- and double-bonded composites », composites part B 77 (2015) 431e439. 11 March 2015.

Remerciements

Louange à notre seigneur et créateur ALLAH qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement et de nous avoir incité à acquérir le savoir. C'est à lui que nous adressons notre gratitude en premier lieu.

A notre Maître et Directeur de memoire Mr BOUHAFS MOHAMMED

Toutes nos reconnaissances et nos grâces pour votre encadrement, votre aide, vos orientations, et vos conseils très précieux. Merci d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail et pour avoir nous encouragé et soutenu tout au long de la mémoire avec patience et disponibilité. Nous vous remercions encore une fois pour la confiance que vous nous aviez accordée. Nous souhaitons beaucoup de bonheur et de santé pour vous et pour votre chère famille.

A Monsieur le président de jury, BOUHAMRI NOUREDDINE

Nous vous remercions de nous avoir fait l'immense honneur de présider ce jury. nous vous exprimons nos remerciements les plus sincères pour l'intérêt que vous avez apporté à notre mémoire et pour toutes vos remarques qui ont contribué à améliorer ce travail. Nous vous souhaitons beaucoup de santé et de bonheur.

A Messieurs les membres de jury d'examination : MEGHDIR ABED

Nous vous remercions d'avoir accepté avec beaucoup de générosité d'examiner notre travail et de nous avoir honorées d'être membre de ce jury. Veuillez accepter nos sincères remerciements et reconnaissances. Nous vous souhaitons beaucoup de succès dans votre vie professionnelle.

Que tous nos collègues et amis de maintenance en électromécanique qui nous ont soutenu tout au long de la réalisation de ce travail trouvent ici l'expression de nos remerciements, aussi bien pour les bons moments passés ensemble, que pour l'aide que nous avons pu échanger. Nous remercions tout ce qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail qu'ils trouvent nos reconnaissances et sincères remerciements, particulièrement, Khaladi Redouane khatir Kadda et Kadri Racha.

Merci beaucoup.

Résumé

Les pipelines de différents diamètres sont souvent utilisées pour le transport des fluides qui sont dans beaucoup de cas enterrés dans le sol, dans le fond marin. Ces canalisations sous pression sont sujettes aux défaillances telles que les corrosions internes et externes, la fissuration, et la déformation.

Notre étude comprend une simulation numérique d'un pipeline en acier de type API 5L X60, afin de suivre l'évolution des contraintes radiales et circonférentielles contenant un défaut de corrosion sous forme d'un rectangulaire. Après de le réparer par un patch en composite.

Les résultats obtenus par le logiciel ANSYS ont montré une bonne l'efficacité de la réparation de pipe par patch en composite.

Mots clés : pipeline, acier API 5L X60, corrosion, ANSYS APDL, réparation, patch, composite.

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	1

Chapitre I : Étude sur les pipelines et leur défaillance

I. Introduction	3
I .2. Caractéristiques des tubes	3
1.3 Les aciers pour pipelines	4
1.3.1 Caractérisation et propriétés	4
1.4. Fabrication de tubes	5
I .4.1. Les tubes soudés sous forme spirale	5
I .4.2. Les tubes soudés sous forme longitudinale	5
I.4.3. Les tube sans soudure	6
I.5 Revêtement des tubes :	7
I.6. Défaillances des tubes :	7
I .7. Différents types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations	7
I.7. 1. Fissure	8
I.7. 2. Critère de la corrosion :	8
I.7.3 Éraflure	8
I.7. 4 Enfoncement	9
I.7. 5 Endommagement combiné (éraflure+ enfoncement)	9
I.8. Détection des défaillances :	9
I.8.1. Détection des défauts par contrôle visuel :	9
I.8.2. La radiographie	9
I.8.3. Contrôle par ultrasons	9
I.8.4. Outil intelligent	10

I.9. Traitements de réparation	10
I.10. Méthodes de réparations (réhabilitations) des pipelines	10
I.10. 1 Ré-enrobage	11
I.10. 2. Coupe et remplacement après vidange et inertage	11
II.11.conclusion	11

CHAPITRE II : Réparation des pipelines par matériaux composites

II.1 Introduction	12
II.2.Matériaux Composites	12
II.3.Les Eléments Constituants d'un Matériau Composite	12
II.3.1. Fibres de renforcement	13
II.3.2. Les matrice	13
II.3.2.1. Les résines (organique)	14
II.3.2.2. Les charges (minérales)	14
II.3.3. Remplissage « Infill »	15
II.4.Domains d'application	15
II.5. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites	15
II.6. Systèmes de réparation par renforcement des fibres composites	16
II.6.1. Système de réparation par matériaux composites flexible	16
II.6.2. Système de réparation par matériaux composites pré-durci	17
II.7. Conception de système de réparation en matériau composite	19
II.8.Conclusion	19

Chapitre III : recherche bibliographique et modèle mathématique

III.1.Introduction	20
III.2. Recherche bibliographique	20
III.3. Étude analytique des rapports contrainte, pression interne pour les pipelines	25
III.3.1. La contrainte de Von Mises	26
III.4. Analyse élastique des éléments de conduites avec corrosion	26
III.5. Théorie linéaire classique de l'élasticité	26
III.5.1 Déformations linéaires	26
III.5.2. Les déformations directes	27
III.5.3. Les déformations de cisaillements	27
III.5.4. Loi de comportement	27

III.6. Codes d'évaluation	28
III.6.1. Un peu d'histoire sur les méthodes d'évaluation des pipelines à défauts	28
III.6.2. ASME B31G.....	30
III.6.2.1. Pression ultime pour un Défaut parabolique	32
III.6.2.2. Pression ultime pour un Défaut rectangulaire	33
III.6.3. ASME B31G modifié ou 085DL	33
III.6.4. Application du code ASME B31G modifié	33
III.6.5. ASME PCC-2	34
III.7. Le PDAM (The Pipeline Defect Assessment Manual)[.....	34
III.8. Conclusion	35

CHAPITRE IV : Simulation Numérique Et Discussion Des Résultats

IV.1. Introduction	36
IV.2. Modélisation et simulation numérique	36
IV.2.1. Présentation de code calcul Ansys Mechanical APDL	36
IV.2.2. Représentation de la géométrie et caractéristiques mécanique	36
IV.3. Modélisation numérique d'un tube sans défaut	37
IV.3.1. Discrétisation du avec l'élément solide 186	37
IV.4. Modélisation numérique d'un tube avec défaut	38
IV.4.1. Représentation géométrique	38
IV.4.2. Discrétisation du domaine d'étude en éléments finis	39
IV.5. Modélisation numérique d'un tube comportant un défaut rectangulaire réparée par collage de composite	39
IV.6. Validation des résultats :	40
IV.7. Répartition des contraintes radiale, circonférentielle :	43
IV.7. 1. Distribution des contraintes radiale :	43
IV.7. 1.1. Pipe corrodé	44
IV.7. 1.2. Pipé réparé	44
IV.7. 2. la contrainte circonférentielle	46
IV.7. 2.1. pipe avec défaut rectangulaire	47
IV.7. 2.2. Pipe réparé	48
IV.8. Effet de l'angle d'orientation de fibre sur la réparation par patch	49

IV.9. Effet de l'épaisseur de patch sur la réparation	51
IV.10. Effet de choix de matériaux de réparation	52
IV.11. Conclusion	53
V. conclusion générale	55
Références bibliographiques	57