

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 08 Mai 45 de Guelma

Ecole Doctorale Nationale en Mécanique De Construction

« EDNMC »

Mémoire de Magister



Département de Génie Mécanique

Spécialité : Mécanique de Construction

Option : Mécanique &t Maintenance Industrielle

Présenté par : Brahim ISSASFA

**Etude de l'endommagement, entretien et réparations des tubes
de transport des hydrocarbures en utilisant des matériaux
composites**

Devant le jury :

Président	Pr.	Nouredine OUELAA	Université de Guelma
Rapporteur	MC. A	Abderrezak BEZAZI	Université de Guelma
Examineur	Pr.	Bachir REDJEL	Université de Annaba
Examineur	Pr.	El Abasse ADDA BEDEA	Université de Sidi Belabes
Invité	Mr.	Noureddine TLILI	ALFA Pipe Annaba ANABIB

2010

REMERCIEMENT

Arrivé a terme de la rédaction de ce mémoire, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma gratitude et mes remerciements à tous ceux qui, par leur enseignement, leur soutien et leurs conseils, m'ont aidé à sa réalisation qui a été effectué à l'université de 08 mai 1945 Guelma dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire d'essai de la société ALFA Pipe Annaba ANABIB.

Je remercie de tout coeur :

Mon directeur de Thèse le Dr. **BEZAZI Abderrezak** pour la confiance et l'attention qu'il m'a accordé tout le long de cette étude.

Mes remerciements au responsable du laboratoire d'essai métallurgique et mécanique Monsieur **TLILI Nourddine** pour les discussions enrichissantes, les conseils qu'il m'a donnés durant mes deux stages à ALFA pipe.

Je remercie le professeur **OUELAA nouredine** du département de Génie mécanique de l'université de Guelma qui ma fait le plaisir et l'honneur de présider mon jury de soutenance.

Je remercie également tout les membre de jury, le **Pr. REDJEL Bachir** de l'Université de Annaba, le **Pr. ADDA BEDEA El Abasse** de l'université de sidi Belabes et **Mr. TLILI Nouredine** de ALFA Pipe Annaba ANABIB.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur le chef de département de Génie mécanique le **Dr. YALESE Mohamed Othmane** et aux techniciens de l'atelier de mécanique.

résumé

A l'heure actuelle, la qualité de réparation des pipelines destinés au transport par canalisation des hydrocarbures est une question primordiale. L'objectif dans ce cas est de réduire les ruptures (ou les éclatements) des tubes dont les conséquences sont souvent désastreuses. L'introduction des matériaux composites dans la réparation des pipelines est une technique nouvellement introduite et qui est encore mal connue. Le travail présenté est une contribution à l'étude de l'endommagement, entretien et réparations des tubes de transport d'hydrocarbure en utilisant les matériaux composites qui constituent une réponse à cette préoccupation, en y ajoutant l'aptitude de ces matériaux à être façonnés au gré des applications. L'étude présentée porte sur deux aspects, expérimentale et théorique de simulations. Les essais expérimentaux de traction, pliage, Charpy, permettent de caractériser le matériau utilisé à savoir le X70. Les essais réels sur des pipelines coûtent très cher, à cet effet nous avons développé des modèles de simulations numériques en 2D et 3D du gonflement de tubes sans défaut et avec endommagement localisée par fissure ou corrosion réparé et non réparé par matériau composite. Cette étude apporte des méthodes et des informations qui permettent une optimisation de la maintenance et la mise en oeuvre de simulation afin de prévoir le comportement, les défaillances (fissure, corrosion) et la maintenance des tubes durant leur exploitation.

Mots clés : tube, pipeline, soudage, essais mécaniques, gonflement des tubes, maintenance des pipes, matériaux composite, simulation numérique.

Tables des matières

Introduction générale.....	7
Chapitre I Etude Bibliographique.....	10
I.1 Introduction.....	11
I.2. Les aciers à hauts grades pour pipelines.....	13
I.2.1. Des pipelines d’hier aux pipelines d’aujourd’hui.....	13
I.2.2. Evolution des dimensions des tubes et des conduites.....	17
I.2.3 Evolution des caractéristiques mécaniques des tubes.....	18
I.3 Fabrication des tubes.....	19
I.3.1 Fabrication de tubes soudés longitudinalement.....	19
Formage	19
Soudage:	20
Calibrage:	20
I.3.2. Fabrication des tubes par soudure spirale.....	20
I.3.3.Effets de fabrication.....	21
a). Interaction : " Soudage -Tubes "	21
b) Effet de la pré-déformation.....	21
I.4. Eclatement de gazoducs.....	22
I.4.1. Décompression du gaz.....	22
I.4.2. Déformation du tube.....	23
I.5. La maintenance.....	23
I.5.1. Organisation des opérations sur une installation pétrolière.....	23
I.6. La réparation.....	23
I.6.1. Scénarios de réparation de pipe.....	24
a) Pipe sujet à la perte externe de métal.....	24
b) Pipe sujet à la perte interne de métal.....	24
c). Pipe sujet à la fuite	25
I.6.2. Gamme des brides disponibles et connecteurs/accouplements de réparation	25
a) Les brides de réparation.....	25
b) Réparation des accouplements et des connecteurs.....	28
I.7. L’utilisation des matières composites pour la réparation des canalisations.....	29
I.7.1. Types de réparation par matériaux composites.....	31
I.7.2. Conseils de conception.....	31
I.8 Aspects importants des réparations	32
I.8.1 Préparation de surface.....	32
I.8.2 Traitement de stratifié de réparation.....	32
I.8.3. Documentations des données nécessaires.....	32
I.8.4. Inspection des réparations par composite	32
I.9. Conclusions.....	33
Chapitre II Modélisation du comportement des pipelines.....	34
II.1. Introduction.....	35

Nomenclature.....	35
II.2. Contrainte et déformation dans les cylindres.....	36
II.2.1. Rappels concernant les enveloppes ou cylindres minces.....	36
II.2.2 cas d'une pression interne P_i et externe P_0 de tube.....	36
II.2.3. Cas d'une pression interne P_i seule.....	37
II.3. Equations fondamentales.....	39
II.4. Comportement mécanique du tube dans les conditions de service.....	40
II.4.1. Sollicitation du corps du tube.....	41
II.4.2. Sollicitation de la soudure.....	41
II.5. Comportement des tubes en spirale dans une canalisation.....	42
II.5.1. Comportement sous pression intérieur statique.....	42
II.6. Analyse des systèmes de renforcement par enveloppe en matériaux composites pour les pipelines métalliques avec imperfections ou endommagements localisés.....	42
II.6.1. Modèles de base - pipe sans endommagements localisés.....	43
Critère de Von Mises.....	45
II.6.2. Endommages localisés.....	46
a). Fissures externes ou internes.....	46
b) Fissuration en cuvette à travers l'épaisseur de la paroi.....	43
c). Défauts de corrosion.....	48
II.7. La norme de réparation ASME.....	50
II.8. Utilisation future des réparations par composites.....	52
II.8.1. Réparation du pipe ayant une paroi perdu par corrosion.....	53
II.8.2. nombres de couches.....	53
II.8.3. Longueur axiale de la réparation.....	53
II.9. Conclusion.....	54
Chapitre III Elaboration des tubes et caractérisation de leurs matériaux.....	55
III.1. Introduction.....	56
III.2. Procède de fabrication des tubes.....	56
III.2.1. Tubes soudés en spirale.....	57
III.3. Paramètres de la soudure.....	59
III.4. Introduction sur les propriétés générales du matériau.....	59
III.4.1 Le découpage des éprouvettes pour les essais de caractérisation.....	60
III.4.2. Les essais mécaniques	60
III.4.2.1. Essai de traction.....	60
a). Description :.....	60
b). Dimensionnement de l'éprouvette d'essai	61
c). Machines d'essais.....	62
d). L'essai :.....	62
III.4.2.2. Essai de dureté.....	64
a) Paramètres d'essai.....	65
III.4.2.3. Essai de pliage.....	66
III.4.2.4. Essai au choc (Charpy).....	68
a). Distribution des contraintes en fond d'entaille dans une éprouvette	
<i>CHARTPY</i>	69
b). Mesure d'une énergie de « rupture ».....	69
III.5. Les examens de structure.....	70
III.5.1. Macrographie.....	70
III.5.2. Micrographie.....	71

III.6. Compositions chimique du matériaux de pipe X70.....	71
III.6.1. SPECTROLAB.....	71
III.7. Contrôles des tubes.....	73
III.7.1. Contrôles visuels.....	73
III.7.2. Contrôle par radiographie.....	73
III.7.3. Contrôle par magnétoscopie.....	74
III.7.4. Epreuve hydrostatique.....	74
III.7.5. Contrôle aux ultrasons automatiques (après test hydrostatique).....	74
III.7.6. Contrôle final.....	75
III.8. Revêtement.....	75
III.8.1. Revêtement intérieur.....	75
III.8.2. Revêtement extérieur.....	75
III.8.3. Objectif du revêtement.....	77
III.9. Conclusion.....	78
Chapitre IV Modélisation par simulation numérique de tube sans défaut et avec endommagements localisés.....	79
IV.1 Introduction.....	80
IV.2. Hypothèse générale de la modélisation.....	80
IV.2.1. Représentation géométrique.....	81
IV.2.2. Les éléments de maillages.....	81
a) Description de l'élément PLANE 183.....	81
b) Description de l'élément SOLID 185.....	81
c) Description de l'élément SOLID46.....	82
IV.3. Matériaux et propriétés.....	83
IV.4. Simulation en 2D d'essai de gonflement de pipe sans endommagement.....	84
IV.4.1. Condition aux limites.....	84
IV.4.2. Résultats et discussions.....	84
IV.5. Simulation d'essai de gonflement de pipe avec endommagement localisé et leur réparation.....	88
IV.5.1. Pipe avec défaut (fissure externe).....	88
IV.5.2. Résultat et discussion.....	89
IV.5.3. Réparation par matériaux composite de la paroi fissurée.....	92
IV.6. Simulation en 3D d'essai de gonflement de pipe sans endommagement.....	94
IV.6.1. Discrétisation de gonflement de tube sans défaut localisé.....	94
IV.6.2. Analyse des résultats.....	95
a) Comportement de tube sans endommagement sous une pression intérieure.....	95
b) Pipe sujet à la corrosion externe.....	99
c) Réparation de défaut de corrosion d'un pipe.....	101
d) Pipe sujet à une fissure longitudinal.....	104
e) Réparation d'une fissure longitudinale par matériau composite.....	107
f) Augmentation de l'épaisseur du matériau de réparation CFRP.....	108
g) Réparation de la fissure par soudure.....	109
IV.7. Conclusion.....	113
Conclusion générale	114
Références.....	116
Annexe.....	120

Introduction Générale

Introduction générale

Les maintenances des pipelines offrent des possibilités d'augmenter la capacité de transport des hydrocarbures (gaz et pétrole) par l'élévation de la pression de service et la récupération des structures après la défaillance des conduites de transport qui ne sont pas encore utilisées de nos jours de manière assez rationnelle, alors que les tendances mondiales dans ce domaine prévoient augmentation de leur durée de vie. Le passage à des pressions de service élevées à long terme nécessite l'amélioration des propriétés mécaniques des aciers de ces derniers et de trouver des solutions techniques, de manière à réduire les épaisseurs des parois contre les défaillances des pipelines destinés au transport des hydrocarbures. En d'autres termes, la qualité des hydrocarbures de grand débit et les risques naturels ou des effets mécaniques dépend du choix de la meilleure combinaison entre les propriétés des pipes, à savoir la résistance et la ténacité.

Les valeurs des charges extérieures sollicitant la conduite et sa capacité portante ont un caractère aléatoire qu'on exprime par certaines fonctions de distributions. En effet, la conduite est conçue d'un nombre fini de tubes, dont les caractéristiques géométriques et la résistance diffèrent de manière aléatoire suite aux imperfections résultant des processus technologiques de fabrication des tôles et des tubes.

A l'heure actuelle, la qualité de réparation des pipelines destinés au transport par canalisation des hydrocarbures est une question primordiale. L'objectif dans ce cas est de réduire les ruptures (ou les éclatements) des tubes dont les conséquences sont souvent désastreuses.

Le travail présenté est une contribution à l'étude de la qualité des tubes destinés au transport des hydrocarbures. Cette étude apporte surtout des informations qui permettent aux concepteurs de comprendre les exigences en matière de qualité des tubes. Les facteurs qui influent de manière prépondérante sur le comportement des tubes dans une canalisation et les agressions externes (corrosion, fissure, rupture,) et les contraintes internes liées aux conditions d'exploitation. L'observation de ces éléments et de leur défaillance ne suffit pas à concéder leur qualité. Les réseaux de transport des hydrocarbures par canalisation en Algérie sont très anciens d'où la nécessité de leur maintenance. Dans cette optique ce travail contribue à apporter des solutions de réparation avec de nouvelles techniques en utilisant les matériaux composites. Les essais réels sur des pipelines coûtent très cher, à cet effet les simulations de situation de travail des tubes, traitées dans ce mémoire de Magister et une étape très importante. Le travail présenté est structuré en quatre chapitres comme suit :

Chapitre I : Etude bibliographique

Dans une première partie de ce chapitre introductif est montrée l'importance des pipelines dans le monde, les types d'aciers utilisés, les méthodes leur fabrication, leurs comportements mécaniques et les effets effectives d'environnement sur les tubes en service (corrosion, fissure,). Les méthodes traditionnelles utilisées pour l'évaluation de la nocivité des défauts dans l'industrie du transport des hydrocarbures et les différentes méthodes de réparation des endommagements qui probablement amoindri le comportement mécanique du pipeline sont présentées dans la deuxième partie de ce chapitre.

Chapitre II : Etude et modélisation mathématique

Ce chapitre contient une étude théorique des problèmes de gonflement de tube sans défaut et avec des endommagements (fissure, corrosion) et les théories de leurs réparations par matériaux composites. Pratiquement l'objectif de ce chapitre est de servir comme support utile pour le chapitre IV.

Chapitre III : Elaboration des tubes et caractérisation de leurs matériaux

Les sections traités dans ce chapitre décrivent les procédures de fabrication des tubes et leur revêtement ainsi que les essais mécaniques (traction, pliage, Charpy) qui permettent de caractériser le comportement mécanique du matériau utilisé à savoir le X70. Des essais pour l'évaluation de la dureté dans les différentes zones (de soudures et matériau de base) ainsi que des essais chimiques permettant la détermination des teneurs des différents composants sont présentés aussi dans ce chapitre.

Chapitre IV : Modélisation par simulation numérique de tube sans défaut et avec des endommagements localisés.

Ce chapitre comporte nos simulations numériques effectuées en deux étapes principales:

- La première étape est une simulation en deux dimensions (2D) pour voir les sollicitations de l'épaisseur de tube sans défaut et avec endommagement, là où la fissure est adoptée comme une défaillance localisée. Des simulations de réparation de tube fissuré puis réparé par matériau composite de type CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic) sont aussi développés.
- La deuxième étape est similaire à la première mais en trois dimensions (3D) pour accéder aux contraintes et déformations dans le volume y compris dans le sens de la longueur du tube. De plus, l'étude de simulation 3D est étendue à une défaillance localisée par corrosion et réparé par une enveloppe composite CFRP ainsi qu'à la réparation de fissure localisée par soudure et par matériau composite.

Le logiciel de calcul de structures par éléments finis ANSYS (Multi physics version 11) est utilisé pour les simulations 2D et 3D présentés dans ce chapitre.

Chapitre 01

Etude bibliographique

Etude Bibliographique

I.1 Introduction

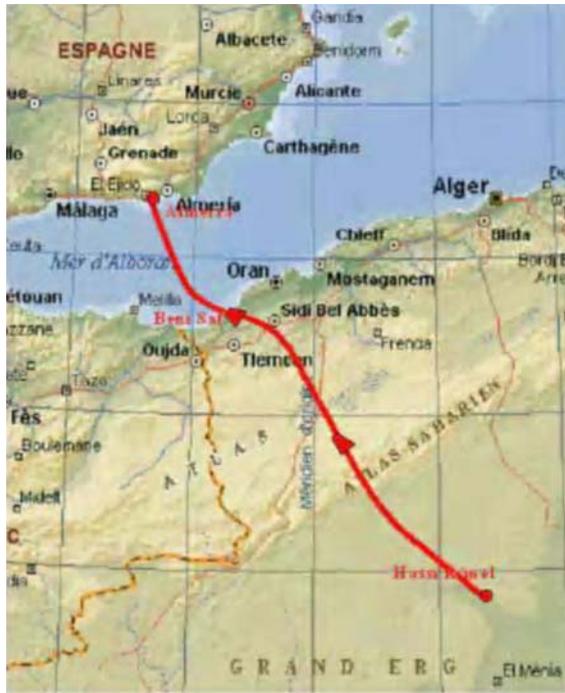
Le transport par pipelines s'impose depuis le début du siècle dernier, reconnu comme le moyen le plus sûr et économique, il se développe d'avantage suite à l'accroissement continu du besoin mondial en énergie et l'apparition de nouveaux consommateurs d'hydrocarbures sur le marché. Environ 8 millions de tonnes de pipelines sont produits chaque année dans le monde [1], et plus de 1,7 million de canalisation de produit pétrolier existent dans le monde entier. Plusieurs de ces canalisations ont été en service depuis les années 40 et les années 50. Au Canada il y a au-dessus de 250 000 kilomètres de pipeline pour le transport de gaz naturel, de pétrole brut et de produit pétrolier [2]. En d'autres termes, la qualité des gazoducs de grand débit dépend du choix de la meilleure combinaison entre les propriétés des tubes, à savoir la résistance et la ténacité. La qualité d'un gazoduc est une question primordiale pour les projets de transport du gaz naturel par canalisation. L'objectif dans ce cas est de réduire les ruptures des gazoducs dont les conséquences sont souvent désastreuses.

En Algérie L'Activité Transport par Canalisations (TRC) gère actuellement un réseau de pipes de 15000 km avec 28 canalisations en service, 69 stations de compression et de pompage. Plus de 260 machines principales, 108 bacs de stockage, 3 bases de maintenance SOMIZ (Maintenance Arzew), SOMIK (Maintenance Skikda) et SOTRAZ (Transport), et 3 ports pétroliers. Ces ports viennent d'être restructurés pour créer une nouvelle société chargée des terminaux marins pour l'expédition et la réception des hydrocarbures (STH) et dont l'objectif principal est le développement des installations portuaires de pétrole. Sur le plan national, la réalisation de plusieurs projets est prévue; la pose de canalisations (+ 2700 km). La réfection de pipes (+ 344 km) et la construction de 21 bacs de stockage et de 11 stations de compression [3]. Ces projets permettront de mettre les capacités à la hauteur des besoins croissants particulièrement avec la relance économique.

Au coeur de ce développement de nouvelles routes d'approvisionnement, d'importants projets d'infrastructures de transport (Figure I.1) ont été lancés en partenariat avec de grands groupes internationaux. Le gazoduc sous-marin, le Medgaz. Considéré « projet d'intérêt européen » par l'UE et qui approvisionnera l'Europe reliera directement l'Algérie à l'Espagne. L'autre gazoduc, Le Glsi qui reliera l'Algérie à l'Italie via la Sardaigne sur une longueur de 1470 km est en cours d'étude. Un autre projet aussi ambitieux que les précédents, le transsaharien, qui reliera le Nigeria à l'Algérie sur une distance de 4550 km pour atteindre ensuite l'Europe. Un protocole d'accord a été signé entre les deux parties et un appel d'offre vient d'être lancé pour l'étude de faisabilité [3].

Toujours sur les plans internationaux, TRC participe au projet Camisea, au Pérou, qui consiste à la construction et l'exploitation d'un réseau de transport et de distribution

d'hydrocarbures. Cette dynamique de développement dans laquelle TRC s'est en fait engagée implique des efforts extraordinaires afin d'adapter et d'élargir les réseaux de transport actuels et des investissements considérables qui requièrent en fait une nouvelle vision dans sa stratégie de développement.



Débit : 80 milliards cm^3

Tronçon onshore

Hassi R'mel à Beni Saf Diamètre : 48'' ; longueur : 550 Km.

Tronçon offshore

Beni Saf à Almería : Diamètre : 24'' ; longueur : 200 Km ; Profondeur : 2100-2200 mètres

Figure (a)

PIPE NEWS Août 2004



Tronçon onshore

Hassi R'mel à El Kala Diamètre : 42''/48'' ; Longueur : 640 km

Tronçon offshore

El Kala – Cagliari, Diamètre : 24'' ; Longueur : 300 km, Profondeur : 2100-2200 mètres.

Tronçon onshore

Cagliari - Olbia (Sardaigne), Diamètre : 42'' ; Longueur : 300 km.

Tronçon offshore

Olbia - C.d.Pescaia

Figure (b)
PIPE NEWS Octobre 2004

Figure I.1. Projets de transport des hydrocarbure par canalisation de l'Algérie vers l'Europe [3].

La consommation de gaz et le pétrole tend à doubler d'ici 2025 en passant de 2500 à 4300 milliards de mètres cubes (Tableau I.1) [1]. Pour assurer la distribution du gaz entre les lieux d'extraction et les consommateurs dans le monde entier, il faut utilisée des méthodes de transport par canalisation (TRC) fiables. L'amélioration des techniques permettant de réduire le temps de construction et de réparation réduit immédiatement les coûts de production de gaz et pétrole. Afin d'augmenter les limites du transport du gaz et du pétrole par pipelines, il faut jouer d'un coté sur l'entretien et d'autre part sur le développement des pipelines. Plusieurs paramètres rentre en jeux : Longue distance, large diamètre, augmentation de la pression interne, optimisation des coûts de la conception, des matériaux, des méthodes d'assemblages, de l'évaluation du terrain et de la construction du pipeline par l'assemblage des tubes fabriquer généralement en aciers à haute limite

d'élasticité qui permet d'avoir pour une capacité donnée un diamètre plus petit ou une épaisseur de tube plus fine que les aciers à limite d'élasticité conventionnelle.

Au cœur de ce développement de transport par pipeline d'approvisionnement, d'importants projets d'infrastructures de maintenance ont été lancés en partenariat avec de grands groupes et de sociétés internationaux. Par exemple, dans l'Amérique du Nord, plus de la moitié du réseau de pipelines de grand diamètre est plus vieux que 25 ans avec les ressources d'entretien limitées [4], il est essentiel que les fonds disponibles soient dépensés où ils diminuent plus efficace dans la réduction meurent des risques posés par des échecs de canalisation à la vie, à l'environnement et aux actifs financiers.

En conséquence, chaque année entre 2 et 3,3 milliards de dollars est dépensée aux Etats-Unis dans la réparation ou le remplacement des canalisations de gaz et de pétrole suite aux problèmes de corrosions [1]. Le phénomène de corrosion externe de canalisation augmente le coût d'énergie et le problème de l'entretien des réseaux de canalisation est un sujet d'intérêt principal aux compagnies d'exploitation des pipelines partout dans le monde.

I.2. Les aciers à hauts grades pour pipelines

I.2.1. Des pipelines d'hier aux pipelines d'aujourd'hui

 **. Des chiffres...**

La demande en gaz naturel risque de crise d'augmentation mondiale, les canalisations sur longues distances sont un moyen sûr et économique de transporter le gaz entre les sites d'exploitation et les consommateurs, qui sont parfois séparés par plus de 5 000 km [1].

Tableau I-1: Données sur la consommation et la production mondiale de gaz naturel
[5]

Région	1973			2001			A	B
	Cons	%	Prod	Cons	%	Prod.		
Europe de l'Est/union soviétique	222	23,0	222	502	48,6	600	280	651
Amérique du Nord	562	28,8	575	623	23,2	645	61	538
Asie en voie de développement	16	1,4	17	249	8,3	210	233	396
Europe du l'Ouest	135	9,7	125	403	22,4	246	268	340
Amérique Centrale et du Sud	22	9,8	22	85	18,8	87	63	226
Monde	980	16,2	999	2120	21,2	2139	905	2151

A est la croissante de consommation 1973-2001

B est l'estimation croissance de consommation 2001-2025

Unités : [million de tep]=[milliard de m³]

% : part de la consommation du gaz naturel dans la consommation totale d'énergie.

1973-2001 : extrait des chiffres clés de l'énergie 2004. Observatoire de l'Énergie d'après AIE/OCDE

2001-2025 : d'après D. YAPP, S.A. BLACKMAN [5]

Comme l'explique Gray [6], les pipelines d'aujourd'hui sont l'aboutissement d'une évolution progressive de leurs propriétés depuis la seconde guerre mondiale, suite à un évènement économique, une catastrophe ou à une découverte scientifique (Tableau I-2).

Tableau I.2. Evolution progressive de propriétés des pipelines et découverte scientifique
Comme l'explique Gray [6].

Date	Evènements	Réactions de l'industrie
1943	Observation de transition ductile -fragile dans les aciers au carbone et navires	Introduction de l'énergie de rupture minimale de 20J dans les spécifications des plaques pour navires
1954	La transition ductile-fragile est considérée pertinente pour les pipelines	TUV introduit l'énergie requise de 34,3J/cm ² pour les pipelines
1960	Rupture fragile sur 13Km dans un gazoduc NPS 30	Développement de l'essai Battelle (BDWTT)
1968	Propagation par rupture ductile dans un matériau non fragile supposé résistant aux fissures	Introduction de l'énergie Charpy minimale issue de différents modèles de rupture
1970	Proposition de construction du gazoduc Alaska/Canada (CAGL)	Développement centré frénétiquement sur l'X80 (551MPa) et des résilience requise à -69°C
1972	Fissuration induite par l'hydrogène dans un pipeline X65-BP à (E.A.U.)	Introduction du test BP (NACE TM-02-84[Solution B])
1974	Arrêt de fissure imprévu lors d'un essai à échelle réelle, attribué aux gaz riches, aux séparations, aux fortes contraintes circonférentielles et aux modèles erronés	Introduction de stop-fissure (crack arrestors). Amélioration de la modélisation de l'arrêt de fissure et révision des idées de laminage pour les pipelines à hautes résistances.
1978	Défaillance par fissuration par corrosion sous contrainte dans des pipelines nouvellement installés en Australie et au Canada	Meilleur contrôle métallurgique (dureté) et amélioration des revêtements externe. Amélioration des protocoles de mise en œuvre.
1978	Pénurie de molybdène et augmentation des prix	X70 sans molybdène. Ajout de NB-Cr+TMCP
1988-89	Augmentation du prix du vanadium à 50%/Kilo	Aciers sans vanadium, substitué par du Mo, Cr+TMCP
1990	Développement des réserve en pétrole et gaz eau profonde et nouveaux pipelines : Oman jusqu'en inde et la mer noire	Pipeline DSAW (roulé soudé) de forte épaisseur résistant au flambement sous pression, développement en même temps que les pipelines en acier à haute grades de 80 Ksi (552MPa) sans soudure

Cette évolution est encore plus marquante lorsqu'on observe les données chiffrées en termes de pression, de diamètre et de capacité volumique, présentées dans le Tableau I-3.

Tableau I.3. Evolution des conditions de transport des pipelines [7].

Année	Pression [bar]	Diamètre [mm]	Capacité annuelle [millions m ³]	Perte de pression 6000Km [%]
1910	2	400	80	49
1930	20	500	650	31
1965	66	900	830	14
1980	80	1420	2600	11
2000	120	1620	52000	8

L'augmentation des propriétés mécaniques permet une réduction de l'épaisseur du tube, le gain de masse (Figure I-2) permet des économies sur l'acier, le transport et le soudage. Par exemple, le surcoût de la production de 10 % lors du passage de l'acier de grade X65 (65 ksi) à l'acier de grade X80 (80 ksi) est largement rentabilisé par le gain de masse de 6%. Les augmentations de performance ont été possibles grâce à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des aciers utilisés pour la fabrication des tubes. En effet, la contrainte maximale circonférentielle (σ_H) d'un tube mince soumis à une pression interne est donnée par la relation suivante:

$$\sigma_H = \frac{PD}{2e} \quad (I.1)$$

Où D, e et P sont respectivement le diamètre, l'épaisseur et la pression de service du tube.

Pour éviter une augmentation trop importante de l'épaisseur des tubes rendant les coûts de production et d'investissement rédhibitoires, il faut développer des aciers possédant une limite d'élasticité de plus en plus élevée. Le développement des pipelines en acier dans le temps est ainsi donné par la figure I.3. Les aciers sont classés d'après l'American Petroleum Institute (API). Le tableau I.4 rassemble les propriétés mécaniques minimales requises pour les pipelines en acier. Les recherches sur la mise au point des aciers à très haute résistance sont essentielles.

Un gazoduc est une structure dont l'intégrité doit être garantie. En particulier, pour éviter tout amorçage de rupture, le dimensionnement de la structure est effectué pour travailler dans le domaine élastique avec un coefficient de sécurité adéquat, ce qui autorise une taille critique de défaut. De plus, la température de transition ductile-fragile de l'acier est choisie de façon à empêcher une rupture fragile du tube. Cependant, la probabilité d'amorçage n'est jamais nulle. Des statistiques établies par European Gas pipeline Incident Group [8]. Recensent, en effet, 1060 cas de rupture en service entre 1970 et 2001 ; 50% de ces ruptures sont causées par des "agressions extérieures". Les autres causes d'incidents notables sont: la présence de défauts dans le matériau (17%), la corrosion (15%), ou encore les mouvements de sol (7%). Pour atteindre un niveau de sécurité plus grand, il est nécessaire de comprendre sous quelles conditions une fissure amorcée dans un pipeline peut s'arrêter rapidement. Pour cela, les spécifications requises pour les aciers de gazoducs prévoient un niveau de résilience suffisant dans les conditions de service.

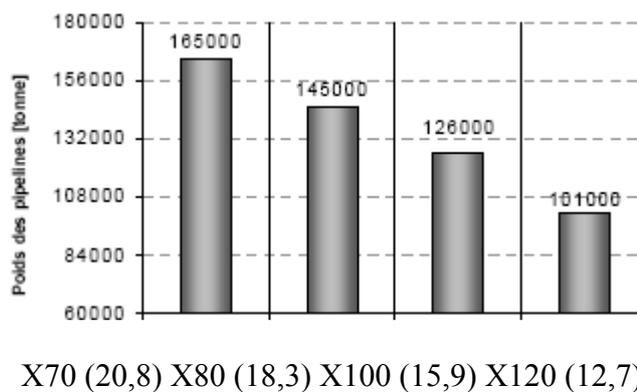


Figure I.2. Aciers de grade API et épaisseur du tube (mm) [9].

La plus grande partie des tubes est composée de matériaux de grade standard, inférieur aux aciers de grade X70. Les grades supérieurs X70 et X80 sont aujourd'hui utilisés pour les pipelines sur longues distances, et les grades X90 et X100 sont en cours d'évaluation. Les développements des aciers X70 et X120 sont en cours [9]. La recherche sur l'X100 a commencé depuis 1978 et se poursuit toujours (Figure I-3).

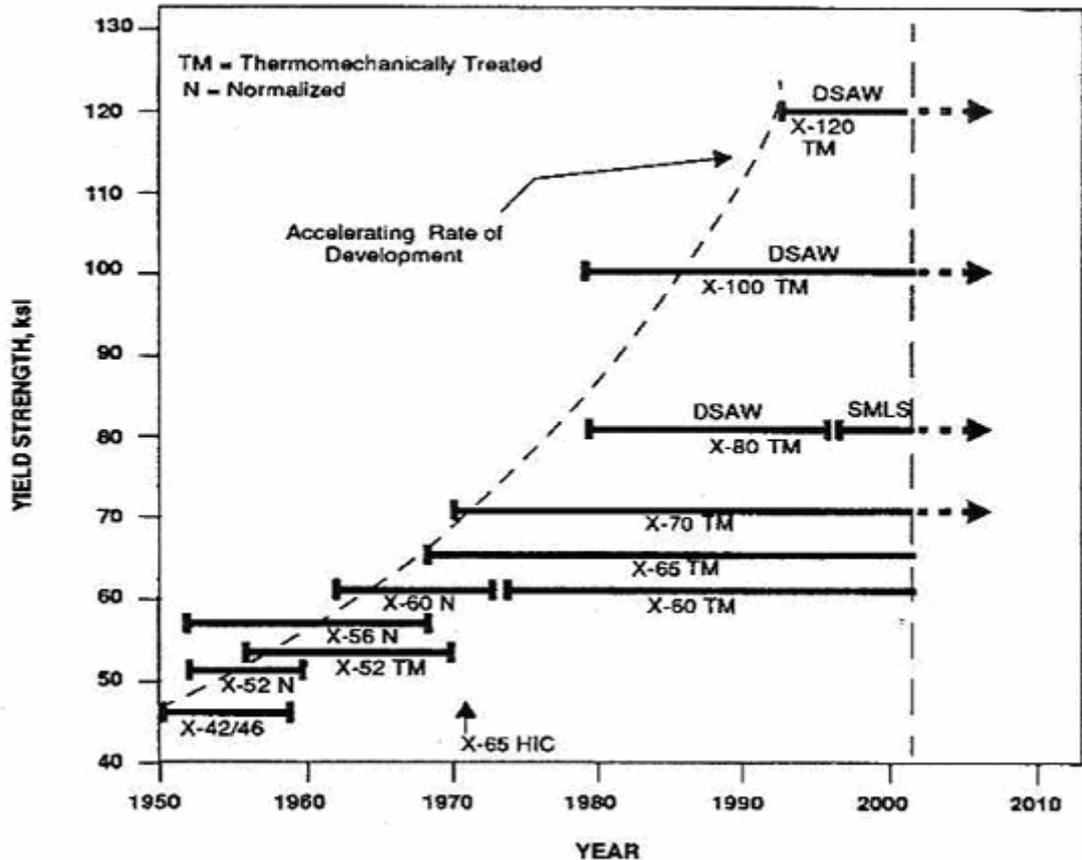


Figure I.3. Développement des pipelines en acier à haute résistance dans le temps, grade et mise en forme [10].

Le Tableau I.4 rassemble les propriétés mécaniques requises pour les pipelines en acier, d'après American Petroleum Institute (API).

Tableau I.4. Les pipelines en acier de grade API.

Grade (\geq)	Limite élasticité (MPa)	Rm (MPa)	Allongement (%)
API-X65	448	530	24
API-X70	483	566	23
API-X80	551	620	22
API-X100	690	770	25

☞ *... et des lettres*

Dans une recherche sur les aciers moderne 'X100, X80, X70,..', on rencontre de nombreuses dénominations telles que les aciers 'HY', 'HSLA' et 'TMCP'. L'HY (High Yield strength) est un acier bas carbone trempé et revenu, allié avec du Ni, du Mo et du Cr. Il a été massivement utilisé par la construction de bateaux pour la marine, puis remplacé par

les aciers bas carbone HSLA (High Strength Low Alloy) contenant du cuivre (HSLA80 et 100), plus soudables [11]. Le cuivre est le principal durcissant dans cet acier à l'opposé des HY où le carbone était utilisé comme élément de durcissement de la martensite [12]. Ce sont des aciers multiphasés contenant de la ferrite polygonale et une seconde phase de bainite et/ou de martensite avec de fins précipités de cuivre. Les aciers TMCP (ThermoMechanical Controlled Processing) sont les matériaux des pipelines modernes, car ils possèdent de meilleures propriétés mécaniques que leurs prédécesseurs et ils sont moins coûteux que les aciers trempés revenus. L'amélioration des propriétés mécaniques des aciers est due à l'obtention d'une microstructure fine qui résulte de la mise au point de la composition chimique et du traitement thermomécanique [1].

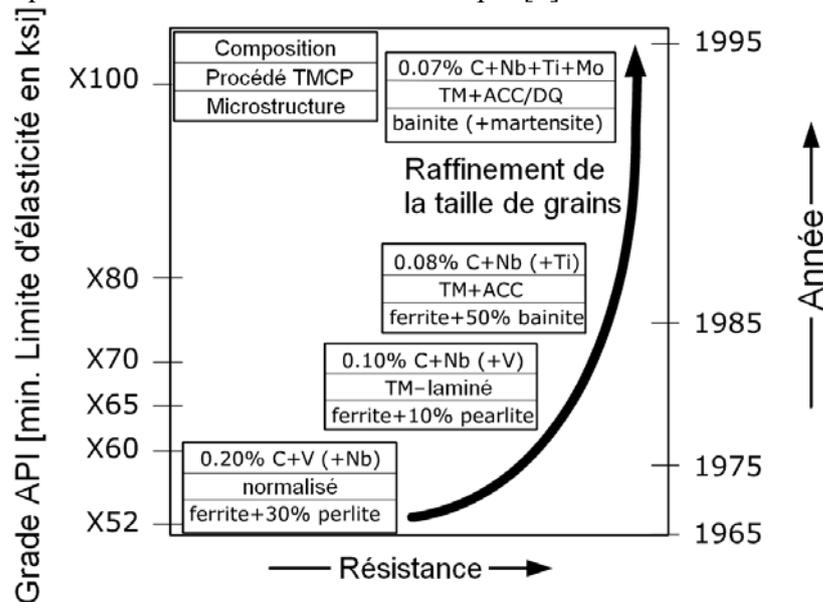


Figure I.4. Développement des pipelines (composition, procédé TMCP, microstructure, API grade) [7].

Le développement des aciers à haute limite d'élasticité est présenté dans la Figure I.4. Dans les années 70, le laminage thermomécanique (TM) remplace le laminage suivi d'une normalisation. Le laminage thermomécanique permet de produire des matériaux équivalents à des X70, à partir d'aciers à faible teneur en carbone et micro alliés au niobium et vanadium. Un procédé amélioré émerge dans les années 80, il s'agit de la combinaison d'un laminage thermomécanique avec un refroidissement accéléré (TM+ACC). Par cette méthode, il est devenu possible de produire des matériaux à plus haute limite d'élasticité, tels que l'X80, qui contiennent encore moins de carbone et de ce fait possèdent une excellente soudabilité. Dans les années 90, le laminage thermomécanique est suivi d'un refroidissement accéléré et d'une trempe (TM+ACC/DQ). Ce dernier procédé, laminage thermomécanique combiné à un refroidissement accéléré, en plus des additions de molybdène, de cuivre et de nickel permet d'augmenter le niveau de résistance jusqu'au grade X100 [13].

1.2.2. Evolution des dimensions des tubes et des conduites

L'amélioration de l'efficacité du transport par canalisation est possible par l'accroissement de la capacité de transport en augmentant les diamètres des conduites, la pression de service, par le refroidissement du gaz transporté, la diminution de la rugosité de la surface interne des tubes et enfin par l'amélioration de la fiabilité de fonctionnement.

Ainsi, tous les facteurs améliorant l'efficacité du transport du gaz naturel par canalisation d'une manière ou d'une autre sont liés à l'évolution de la technique et la technologie de soudage employées lors de la construction des pipelines. De nombreuses études montrent que les facteurs ayant une influence maximale sur la capacité portante des gazoducs sont par ordre décroissant : le diamètre, la pression de service, les distances entre les stations de compression, les taux de compression et la température moyenne du gaz transporté. Alors ce n'est pas par hasard que ces trente dernières années, on était témoin de la construction des gazoducs magistraux de grand diamètre de plus de 1420 mm et le passage de la pression de service de 7,5 MPa à 100 MPa et même 120 MPa. La dépense spécifique en métal des tubes diminue avec l'accroissement du diamètre à la puissance 0,6 et est proportionnelle à l'augmentation de la limite de rupture des aciers selon le matériau. Si l'on considère qu'actuellement on atteint le diamètre limite des gazoducs (1420 mm), alors la tendance principale pour réaliser une économie de métal est l'amélioration des propriétés mécaniques des aciers des tubes. L'augmentation des caractéristiques de résistance de l'acier, seule permet de garder le niveau actuel des épaisseurs des tubes et éviter les problèmes liés au soudage et montage de la conduite sur le tracé. D'autre part, l'augmentation de la capacité de transport des gazoducs est réalisable par l'augmentation de la fiabilité structurelle des tubes et leurs joints de soudure. Le passage à la construction des gazoducs pour des pressions plus élevées est réalisable par la conception des tubes à construction spéciale : tubes à parois épaisse, à multicouches et à bandage.

1.2.3 Evolution des caractéristiques mécaniques des tubes

Le développement des transports à grande distance de quantités importantes d'hydrocarbures a nécessité l'emploi de tubes de grand diamètre, exploités à des pressions plus élevées. Pour éviter d'atteindre des épaisseurs difficiles à souder et faire des économies d'acier, on a eu recours à de nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques améliorées. C'est ainsi qu'on a vu apparaître les grades X60, X65, X70, X80 et même X100. Les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes : aciers au carbone faiblement alliés et aciers à faible teneur en carbone faiblement alliés. Dans le premier groupe on trouve les aciers ferrito-perlitique X42 à X52 (selon API) contenant jusqu'à 0,3 % C, 1,6 % Mn, 0,7 % Si. Dans le deuxième groupe on trouve les aciers ferrito-perlitiques faiblement alliés à basse teneur en carbone X56, X50, X65, X70 contenant 0,12 % C, 0,45 % Si, 0,25 % S, 1,9 % Mn, 0,1 % V, 0,1Nb, 0,015 % Al. Pour les conduites de diamètre supérieur à 1020 mm, destiné à fonctionner sous des pressions élevées, on utilise généralement des tubes en acier de laminage contrôlé [14]. Les propriétés mécaniques des structures ferrito-perlitique peuvent être modifiées, entre autre par l'affinement des grains ferritiques ; c'est le seul procédé qui permet d'améliorer à la fois les caractéristiques de traction et la température de transition. L'objectif est l'obtention d'une structure ferrito-perlitique à grains fin des produits plats laminés. Ces dernières années le laminage contrôlé a été complété par le refroidissement accéléré par arrosage à l'eau afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des tôles. Cela a permis d'accroître la résistance de l'acier de laminage contrôlé, jusqu'à 700 MPa, sans modifier pratiquement la ténacité à la rupture et la tenue au froid. Des études récentes montrent que l'efficacité de l'emploi de l'acier bénitique de composition chimique : 0,03 %C, 0,15 % Si, 1,90 % Mn, 0,04 Ni, 0,02 % Ti, dans la fabrication des tubes de dimensions 1420 x 18,7 mm. De tels tubes ont une ténacité élevée à la rupture ductile, à des températures proches de -30°C avec une tenue au froid suffisante et des limites de résistance à la rupture $\sigma_R = 644$ MPa et à l'écoulement $\sigma_{0,2} = 600$ MPa: British steel.(1995) [14].

I.3 Fabrication des tubes

I.3.1 Fabrication de tubes soudés longitudinalement

Les tubes de grand diamètre soudés longitudinalement sont essentiellement utilisés pour le transport du pétrole et du gaz. Ils sont fabriqués par des tuberiers comme Europipe par le procédé "UOE" (Fig. I.5). La fabrication de ces tubes comporte trois étapes: formage, soudage et expansion et calibrage. De plus, la première étape est divisée en trois sous-étapes: croquage, formage en U et formage en O [10].

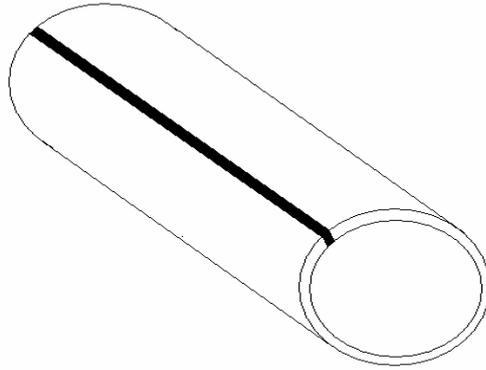


Figure I.5. Tube soudé longitudinalement.

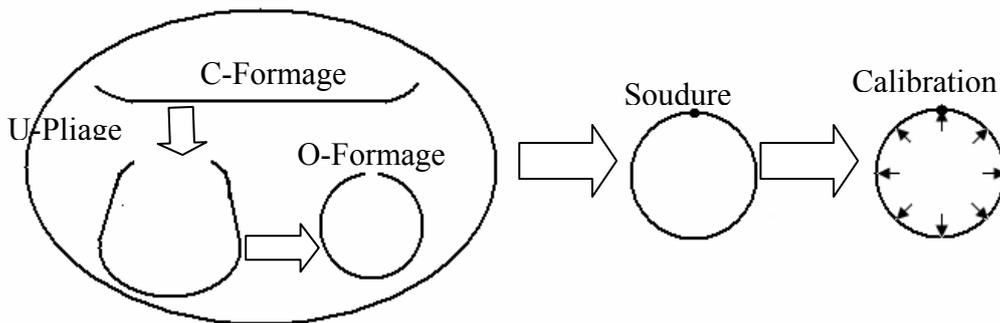


Figure I.6. Les étapes de fabrication de tubes soudés le long du matériau (CTOA) [10].

Formage: Le formage des gros tubes soudés longitudinalement s'effectue à partir de tôles dont la largeur est voisine du périmètre du tube fabriqué et l'épaisseur égale à celle du tube. La mise en forme de la tôle est réalisée de façon unitaire par croquage des rives (C-formage, Fig. I.6) et formage à la presse (Fig. I.7a, b). Plus précisément, la tôle est cisailée dans le sens de largeur et chanfreinée. Les rives sont croquées au rayon du tube, soit à la presse, soit par des galets. La tôle est ensuite formée en "U" et "O" par des presses extrêmement puissantes (2000 à 20 000 tonnes).

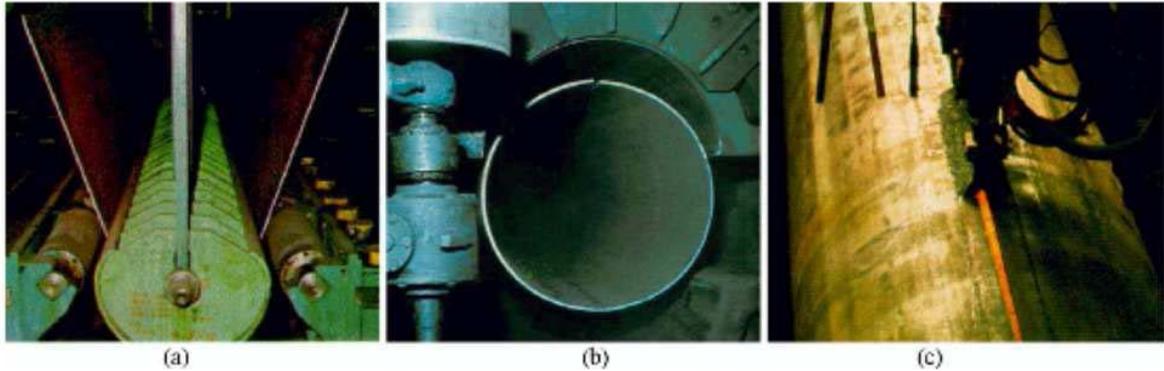


Figure I.7. Fabrication des tubes soudés. (a) Formage en U, (b) formage en O et (c) soudage [16].

Soudage: Le soudage est effectué intérieurement et extérieurement à l'aide de têtes soudeuses automatiques en utilisant la technique de soudage à l'arc sous flux (Fig. I.7 c). Le cordon intérieur est en général réalisé le premier.

Calibrage: Dans le but d'obtenir des tubes de section parfaitement circulaire, ceux-ci sont soumis à une expansion mécanique qui leur fait subir une augmentation de diamètre de 1 à 1,5%. Cette troisième étape permet également de corriger l'inflexion longitudinale due au soudage.

La mise en forme du tube est complexe et les paramètres de fabrication influencent considérablement les caractéristiques mécaniques du produit final. Il est ainsi intéressant de comparer les caractéristiques mécaniques de la tôle servant à fabriquer un tube et celles du tube fini [10].

1.3.2. Fabrication des tubes par soudure spirale

Le tube soudé en spirale **Figure I-8** est obtenu à partir d'un formatage à froid d'une bobine d'acier **Figure I-9**, conformément aux normes API 5L et NFA 49150. La soudure des bords est faite en automatique à l'arc émergé sous flux, l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur dont, la tête intérieure existe dans la machine juste au début de sortie de tube, mais l'autre à une distance de 3 mètres **Figure I-10**. Les deux têtes sont stables et le tube à un mouvement vis écrou. Afin de quelque mètres le tube coupé automatiquement.

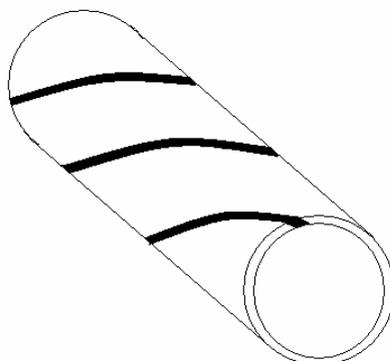


Figure I.8. Tube en soudure spirale.



Figure I.9. Le positionnement de la bobine



figure I.10. La forme de la soudure

1.3.3.Effets de fabrication

a). Interaction : " Soudage -Tubes "

Sur chaque kilomètre de conduite de diamètre 1420 mm, la longueur des soudures exécutées en usine est de 2 Km et celle de leur assemblage est de 0,4 Km. C'est pourquoi, il n'est pas toujours possible d'assurer la stabilité et la bonne qualité des joints de soudure, il y a toujours la possibilité qu'une partie des défauts des joints, non détectés par les contrôles, constitue un danger potentiel pour l'intégrité de la conduite. Les joints de soudure sont sollicités par des chargements complexes durant le transport, le bardage des tubes, la construction et l'exploitation de la conduite. D'autre part, la demande croissante en tubes impose des vitesses de soudage qui atteignent plus de 180 m/h en usine et l'emploi de soudage à multi arcs sous flux. Les modifications les plus importantes de la structure et des propriétés du métal de base résultant de l'échauffement et du refroidissement dans la zone adjacente au cordon sont : la diminution de la plasticité, de la résilience et l'accroissement de la tendance à la formation des fissures à froid et à chaud. Les matériaux de soudage et les processus de thermo-déformations ayant lieu lors du soudage des tubes provoquent l'hétérogénéité des propriétés mécaniques de la ZAT, où plus de 85% des ruptures des oléoducs sont observées. Notons que presque 20% des défaillances enregistrées lors des essais hydrauliques sont des ruines des joints de soudure circulaires, exécutées sur les chantiers de construction des conduites. On note que la technologie de soudage des aciers à structure ferrito-perlétique est basée sur la vitesse de refroidissement admissible dans l'intervalle des températures de faible stabilité de l'austénite. Ce paramètre détermine l'énergie et les régimes électriques du soudage des tubes d'une épaisseur donnée. La particularité caractéristique des aciers des tubes des conduites magistrales est la tendance à la formation de fissures à froid lors du soudage. Ces fissures se forment le plus souvent sur la partie adjacente au cordon de soudure à des températures inférieures à 300 °C. Avec l'augmentation de l'épaisseur des parois, la tendance à la fissuration à froid augmente et cela nécessite l'augmentation de la température de préchauffage. L'augmentation de cette dernière est dans ce cas fonction de la composition chimique, de la catégorie de résistance et de l'épaisseur des parois des tubes [18].

b) Effet de la pré-déformation

Une pré-déformation a des effets sur les propriétés de traction et sur la ténacité du matériau. L'effet immédiat d'une pré-déformation est d'augmenter la limite d'élasticité par écrouissage. L'effet sur les autres propriétés de traction est moins évident. D'après Reed et Knott [19] pour l'acier A533B seule la limite d'élasticité varie, sauf à -196°C où la résistance à la traction R_m diminue après une pré-déformation. De même le coefficient de

striction reste constant après pré-déformation, sauf à 196°C où il chute. Sur des aciers HSLA-80 et HSLA-100, ont observé une chute de l'allongement uniforme A_r après pré-déformation avec $\Delta A_r = \varepsilon_{pre}$ où ε_{pre} est la pré-déformation plastique (Fig. I.11a). En présence d'un palier de Luders sur la courbe de traction, une pré-déformation n'a pas d'effet immédiat sur la limite d'élasticité, Re , que lorsqu'elle est supérieure à la longueur du palier (Fig. I-11b) [10].

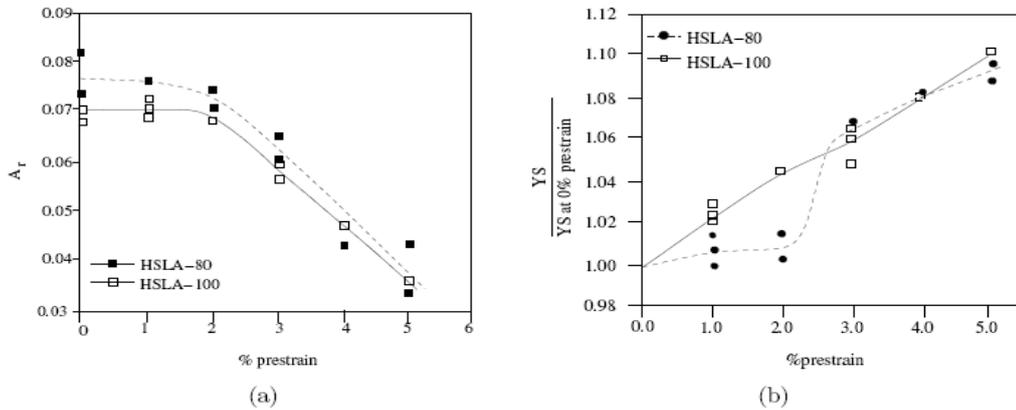


Figure I.11. Effet de la pré-déformation. (a) déformation uniforme vraie (b) limite d'élasticité [10].

I.4. Eclatement de gazoducs

L'éclatement d'un gazoduc, dû à la propagation d'une fissure longitudinale, est présenté sur la photographie 1.12. Il s'agit d'un problème complexe dans lequel intervient un couplage entre plusieurs disciplines : l'hydrodynamique (décompression de gaz), la déformation des coques (parois du gazoduc) et la mécanique de la rupture (comportement du matériau au niveau de la pointe de la fissure) [1].



Figure I.12. Eclatement d'un pipeline [20].

I.4.1. Décompression du gaz

Le gaz s'échappe par l'ouverture créée dans la paroi du tube par la fissure, une onde de décompression commence alors à se propager dans le tube à une vitesse de l'ordre de 300 à 400 $m.s^{-1}$. Le rapport entre la vitesse de l'onde de décompression et celle de la fissure joue un rôle majeur sur la dynamique de propagation. En effet, si la fissure se propage plus vite que l'onde de décompression, la pointe de fissure est toujours chargée par la pression

initiale P_0 . Si, au contraire, la vitesse de fissuration est inférieure, la fissure est progressivement de moins en moins chargée, et s'arrête naturellement [10].

La décompression du fluide est étudiée expérimentalement à l'aide d'expériences d'expansion des tubes à choc. Le tube est bouché par un disque de rupture et instrumenté par des capteurs de pression dynamiques le long du tube [10].

1.4.2. Déformation du tube

Sous l'effet de la pression du gaz sur les parois du tube ouvert, celui-ci se déforme et la section du tube passe d'une géométrie en "O" à une forme en "U" (si la soudure est longitudinale) et puis reste inchangée. Cette ouverture du tube n'est pas à négliger car elle participe au chargement de la pointe de la fissure [10].

I.5. La maintenance

La limitation des risques d'explosion et des fuites dus aux gaz et aux vapeurs sur les installations pendant le fonctionnement pose des questions qui vraiment nécessitent des réponses techniques exécutables et fiables. Le fait qu'un appareil, qu'une unité, ne fonctionne qu'épisodiquement paraît constituer un facteur favorable réduisant la probabilité d'un accident ou d'un événement redouté. Cette limitation n'est pas suffisante, à elle seule, pour permettre l'usage de matériel courant.

- Suppression des produits inflammables
- Limitation des zones à risques d'explosion : Protection par travail en circuit fermé, par surpression, par dépression et par inertage [2].

1.5.1. Organisation des opérations sur une installation pétrolière

L'organisation des opérations sur installation pétrolière définit, la mise en place, les mesures à prendre et les moyens à mettre en oeuvre avant et pendant une opération sur toute installation pétrolière ou dans son périmètre environnant. La politique de gestion des opérations sur les installations est basée sur les principes suivants:

- limitation des travaux à chaud
- limitation des opérations simultanées sur les installations
- identification et contrôle des installations on-line ou off-line
- respect des procédures d'organisation et de préparation [2].

I.6. La réparation

Si les procédures précédentes sont la maintenance préventive, mais après le défaut il faut la maintenance corrective c'est-à-dire la réparation des défauts. Les canalisations des pipelines sujets à plusieurs défauts pendant leurs fonctionnements peuvent être causé par plusieurs paramètres tel que les corrosions, les mouvements de terrains, les actions mécaniques ... etc. Si un faible défaut existe il faut le réparé même si parfois ces réparations sont coûteuses afin de prévenir des ruptures catastrophiques des pipelines causants des dégâts plus importants. Les opérateurs doivent équilibrer les coûts de maintenance avec l'intégrité de canalisation. Le but est d'atteindre un niveau de la sûreté qui semble acceptable à la compagnie et au public avec un coût raisonnable. Les méthodes de réparation qui peuvent être appliquées à l'intérieur où à l'extérieure d'une canalisation de transmission de fluide sont une alternative attrayante aux méthodes conventionnelles de réparation puisque la nécessité d'excaver la canalisation est exclue. Cela est particulièrement important pour des canalisations dans des secteurs sensibles et fortement peuplés. Plusieurs méthodes de réparation sont généralement appliquées à l'extérieur et à l'intérieur du pipeline et des méthodes additionnelles de

réparation sont aussi généralement appliquées à d'autres types de canalisations (lignes de distribution de gaz, lignes de flottaison, etc.) ont l'applicabilité éventuelle mais exigent du développement ultérieur de répondre aux besoins de transmission de fluide.

1.6.1. Scénarios de réparation de pipe

Il y a trois scénarios principaux de réparation sont considérés : le tube sujet à la perte externe de métal (provoquée par la corrosion ou les endommagements mécaniques), à la perte interne de métal (provoquée par la corrosion, érosion ou érosion/corrosion) et aux éléments de tuyauterie qui fuit. En plus de ces scénarios principaux de réparation, l'ampleur de la détérioration ou des endommagements localisé ou étendu sera également considérée lors du choix des méthodes et des éléments de réparation. Ces scénarios sont décrits plus loin dans les sections suivantes [21] :

a) Pipe sujet à la perte externe de métal

Beaucoup de rupture de canalisations en été provoqués par la corrosion externe. Qui peut être présente sous beaucoup de formes comprenant la corrosion d'environnementale simple (par exemple corrosion après rupture de revêtement, corrosion sous isolation etc.), la corrosion de crevasse et la corrosion galvanique. Indépendamment du mécanisme réel de corrosion qui est en activité, les endommagements en résultant sont sous forme de perte en métal c'est à dire une perte de l'épaisseur dans la paroi. Cette perte peut être localisée (comme dans le cas de la corrosion sous appui du pipeline) ou peut être étendue (dans le cas de la corrosion sous l'isolation). Les endommagements mécaniques à la canalisation peuvent, ou ne peuvent pas être accompagné de la perte du métal. Par exemple, un poinçonnement peut provoqué une simplement déformation locale du pipe sans creusage de gouge ou associé a un amincissement de la paroi de pipe. Des bosselures plates jusqu'à 6% du diamètre du pipeline n'ont pas besoin d'être réparées. Des effets plus profonds peuvent devoir être réparées ou enlevées si leur présence pourrait poser les problèmes opérationnels. En vertu de leurs causes probables, des bosselures sont considérées comme un exemple des endommagements localisés. La réparation d'une section fendu d'une canalisation impliquerait d'arrêter toute autre propagation (permettant ainsi que la fissure elle-même ne menace pas l'intégrité du système) ou enlèvement/réparation. Indépendamment de la cause de la perte externe du métal, il est supposée que la prévention d'éventuelle détérioration sera automatiquement adressée par la combinaison de l'exclusion des endommagements/détérioration (mesures prises pour empêcher la re-occurrence) et de l'action de réparation elle-même [21].

b) Pipe sujet à la perte interne de métal

Les fluides transportés dans les systèmes des tubes, particulièrement en pétrole et gaz et des produits pétrochimiques, peuvent présenter des problèmes de corrosion interne, d'érosion, ou d'une combinaison de la corrosion et de l'érosion. Dépendant de la sévérité et l'ampleur des endommagements/détériorations internes que la canalisation peut couler ou être dans la menace de la fuite. Le scénario de réparation considéré ici, cependant, est quand la perte interne en métal n'a pas eu comme conséquence la fuite. À la différence de la corrosion externe, il peut ne pas être possible d'arrêter le mécanisme de perte en métal et davantage d'endommagements/détérioration temps- dépendants continueront. À moins qu'il soit possible d'arrêter le mécanisme de perte en métal, les éléments choisis de réparation devront adapter aux effets de la détérioration supplémentaire certaine. Dans ces cas le rétablissement de l'intégrité de pipe peut seulement être considéré provisoire, à moins que la conception des composants de réparation adresse spécifiquement les effets davantage de

détérioration, au moins jusqu'à la vie restante du système de canalisations. À la différence de la corrosion externe, il est plus difficile mesurer la corrosion, érosion ou corrosion/érosion interne, en termes de perte absolue en métal et ampleur de cette perte. Les techniques d'inspection sont disponibles, comme les ultrasons et la radiographie, pour aider à cette quantification. Ce qui est important d'obtenir autant d'information possible sur les endommagements/détérioration pour permettre à la méthode correcte de réparation d'être choisie. Il est particulièrement important d'obtenir l'information concernant la capacité des endommagements subis d'adapter aux contraintes qui, dans les systèmes de pipe complexes, peuvent être significatifs. En outre, davantage de détérioration ou la perte interne existante en métal peut avoir comme conséquence la paroi de pipe ne pouvant pas supporter ces charges [21].

c). Pipe sujet à la fuite

La fuite peut être provoquée par la perte interne ou externe en métal (ou, très rarement, une combinaison des deux). La fuite peut également être provoquée par la fissuration des coutures ou des joints soudés ou de la pipe de parent elle-même. Selon l'ampleur des endommagements découverts, la réparation peut exiger l'installation d'une bride de réparation (réparation localisée) ou du remplacement d'une section de pipe utilisant des connecteurs ou des accouplements. Dans tous les cas où le contenu de pipe est fuité, il sera nécessaire de considérer la convenance du composant de réparation adapter non seulement aux conditions de retenue de pression, mais s'adapter également corrosivement et à d'autres effets des fluides. Par exemple, les joints élastomères utilisés dans de certains brides/connecteurs de réparation peuvent être susceptibles de la détérioration en présence des hydrocarbures, des compositions volatils etc. Les issues de la dégradation/relaxation et à long terme possibles de joint en ont besoin d'abord de refouler/prise la nécessité de fuite d'être considéré. Dans certains cas il peut être possible d'installer une bride de réparation dans une pipe disjointe réelle - la bride qui enferme le secteur défectueux et disjoint est équipée de prise de passage qui peut être fermée une fois la bride a été correctement installé et serré [21].

1.6.2. Gamme des brides disponibles et connecteurs/accouplements de réparation

Un des aspects fondamentaux de l'endommagement du pipe qui dicte le type de composant de réparation peut appliquer dont les conditions de la surface externe du pipe sont mieux. Si la surface externe est endommagée dans la mesure où un joint élastomère ne peut pas fournir les forces suffisantes de cachetage à proximité immédiate des endommagements, ou dans les secteurs relativement inchangés aux voisinage d'endommagement majeur (ces domaines étant utilisé pour effectuer le scellement par des colliers de réparation 'stand'-off repair clamps). Une certaine forme de matériau de remplissage est parfois nécessaire sur la surface externe du pipe pour qu'il soit rétablie. Les développements par l'utilisation des douilles en acier remplies par une résine époxyde ont montrés quelle peuvent s'adapter pour répondre a des demandes de gamme entière de défauts, y compris la corrosion, non propagation des fissures, les bosselures ou les goujures dans l'orientation axiale et circulaire et les anomalies associées au soudures de périmètre, Mais ces outils de réparation sont applicables à des dimensions des diamètres normalisées et dans des cas spécifiques (par exemple à une longueur limité de défaut).

a) Les brides de réparation

La forme la plus simple du composant de réparation est une pièce rapportée métallique qui peut être appliquée pour couvrir un petit défaut. La réparation comporte la

soudure par le filet soudant dans le pipe d'une pièce rapportée convenablement incurvée. La paroi du pipe dans les régions de soudure, qui sont à loin du secteur du défaut, doit être sans défaut et d'épaisseur suffisante. Ce type de réparation est très rarement appliqué au haut niveau d'intégration et n'offre aucun avantage principal par rapport à une bride de pièce rapportée (Figure I.13) ; un simple bride boulonnée qui tient une pièce rapportée de matériau élastomère au voisinage du secteur du défaut.

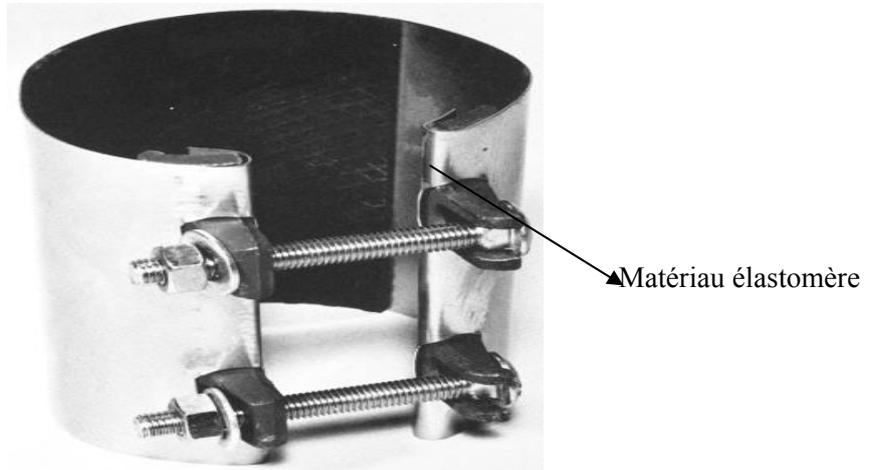


Figure I.13. Bride de pièce rapportée.

Dans le cas d'une petite fuite de la taille d'une épingle sur une section de pipe, une bride de pièce rapportée simple peut être utilisée ou une bride spéciale de réparation de fuite de trou d'épingle. Pour la réparation de cette fuite en utilise une bride a goupille de repère qui guide un joint aigu de cône dans le trou. La pression est alors appliquée au joint du cône par une vis de pression et une fois que le joint est comprimé, la goupille peut être enlevée de ce fait accomplissant le joint. Ce type de réparation est capable de résister à des pressions d'utilisation supérieur à 138 barre (2000 psi). Un exemple d'une bride de réparation de fuite de trou d'épingle est montré ci-dessous [21].

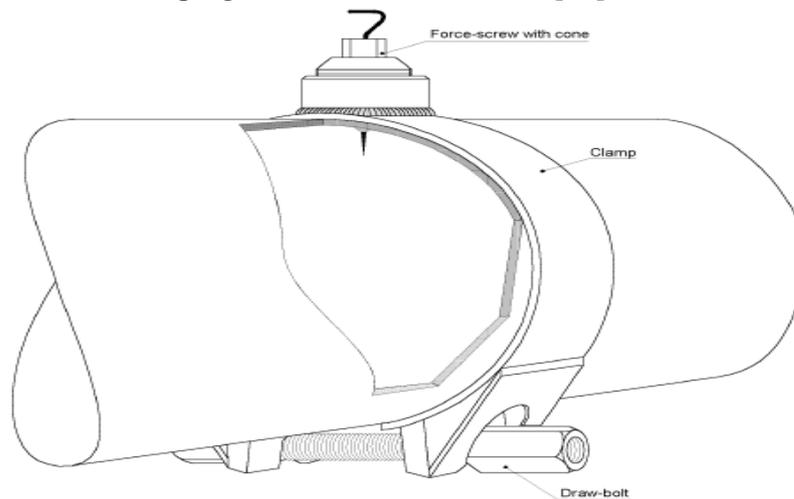


Figure I.14. Bride de réparation de fuite de la taille d'un trou d'épingle [22].

Une section défectueuse de pipe peut être simplement renforcée en employant les douilles d'encerclage simples. Les douilles sont sous forme de deux moitiés et sont clôturent l'ajustement au diamètre extérieur du pipe. Les deux moitiés sont soudées ensemble longitudinalement (des bandes de soutien sont utilisées pour les soudures longitudinales pour empêcher des endommagements induits par soudure, ou des

changements de propriétés mécaniques, sur la surface de pipe). Pour des applications contenant des pressions, la douille doit être complètement lié par un joint soudée avec le pipe. Un exemple d'une douille d'encerclement est montré ci-dessous (Figure I.15).

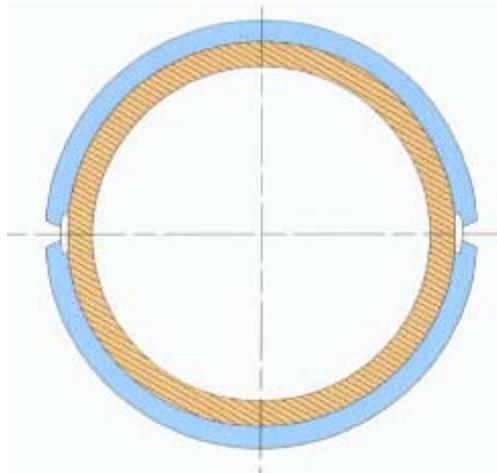


Figure I.15. Douille de réparation type encerclement.

La forme la plus commune des composants de réparation de pipe est les brides de réparation d'impasse ('stand-off' repair clamp) ; ces brides sont habituellement formées par deux demis coquilles cylindrique (Figure I.16). Cependant, les brides de basse pression peuvent être fournies sous forme d'ensemble d'une seule pièce flexible qui peut être posé dans le défaut du pipe. Les brides de réparation d'impasse désigner parfois sous le nom de clôtures de vertu du fait qu'elles ferment totalement le secteur défectueux dans un scellement de retenue de pression. Le cachetage de la clôture est typiquement par des joints élastomères aux joints longitudinaux des deux demis coquilles et les joints aux extrémités du cylindre.

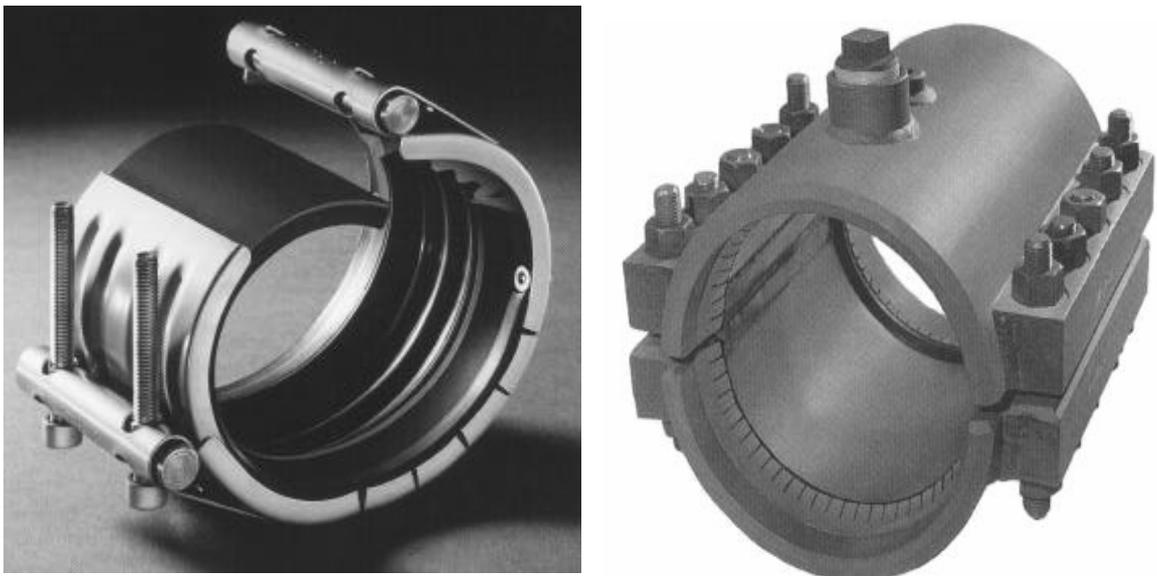


Figure I.16. Deux types de brides de réparation type 'stand-off'

b) Réparation des accouplements et des connecteurs

Dans les situations où il y a eu des détériorations et endommagements importants d'une section de canalisation il peut ne pas être possible d'effectuer des réparations par l'utilisation des brides ou des douilles simples. Les brides tendent à être disponibles dans des tailles standard (diamètre et longueur) et le délai d'exécution et les coûts liés à la production des brides extra longues est habituellement prohibitif. Cependant, il y a des situations où ces coûts sont justifiés afin d'éviter la fermeture de l'usine (ou de l'approvisionnement), ceci naturellement par la quantification des endommagements existants et que les risques liés à la continuation de la production sont acceptables.

Habituellement, la solution de réparation la plus économique impliquera le remplacement de la section endommagée de la canalisation. Ceci peut être envisagé dans le cas où les flasque raccordements existants et sont disponibles pour faciliter le remplacement d'une section de canalisation endommagée. Alternativement la réparation peut être simplement une soudure sur place au lieu d'une rechange d'une section du pipe. La solution la plus économique de réparation pour des situations où des endommagements importants ont été trouvés est d'utilisé des accouplements ou des connecteurs en même temps qu'une section de rechange de pipe. Une solution typique comprenant l'utilisation des connecteurs est illustrée ci-dessous (Figure I.17).

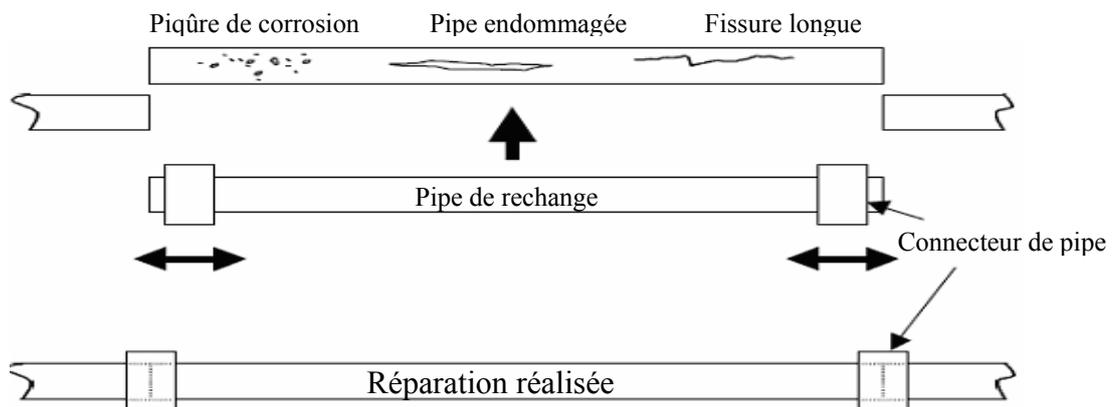


Figure I.17. Utilisation des connecteurs de pipe de réparation.

Les connecteurs plus sophistiqués sont capables de satisfaire des estimations de pression jusqu'à la classe 2500 lb - 690 bar (10 000 psi) et des diamètres de pipe allant jusqu'à 48 pouces. Sur certains des connecteurs de réparation, des ports de raccordement de pression externe permettent à l'intégrité des joints radiaux d'être vérifiée.

Une méthode de réparation originellement développée pour des applications transnationales de canalisation, il y a déjà plus d'une décennie, mais maintenant considérée également applicable aux systèmes de pipe au sol (Figure I.18) est capable de résister à des efforts circulaires et axiaux élevés sans joint de soudure c'est-à-dire que la réparation est effectuée directement par le bridage d'une douille sur le pipe ou par l'utilisation d'un connecteur de pipe avec des outils de préhension.

La méthode de réparation utilisant des douilles en fente dans la conjonction avec une résine époxyde c'est également avéré capable de tolérer la perte interne continue en métal ; incluent la croissance de perte en métal à travers le mur du pipe.

Cette méthode de réparation n'est pas une méthode rapide de réparation puisque les deux demi coquilles exigent la soudure longitudinalement et l'époxyde une fois quelle est mélangé et injecté dans l'espace annulaire, elle a besoin d'approximativement 24 heures pour polymériser et donc peut supporter jusqu'à 90% de sa charge ultime. La technique époxy- remplie de douille de réparation est illustrée à la figure I-18.

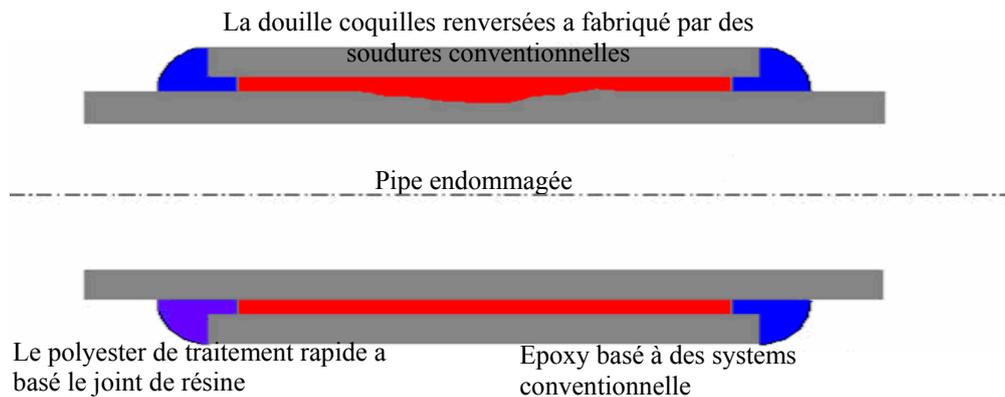


Figure I.18. Douille de réparation remplie par époxyde.

I.7. L'utilisation des matières composites pour la réparation des canalisations

L'utilisation des matières composites pour la réparation de la canalisation d'acier sur les systèmes qui ont été à l'origine conçus selon ASME/ANSI B31.3 pour les tuyauteries d'usine chimique et de raffinerie de pétrole. Considérant que ces codes et normes fournissent des règles pour la conception, la fabrication, l'inspection et l'essai de nouveaux systèmes des pipes, ils n'adressent pas le fait que ces systèmes peuvent dégrader en service et exiger la réparation. Cet examen de l'utilisation des matières composites pour la réparation de la canalisation couvre les circonstances suivantes :

- ▶ la corrosion externe où il n'y a aucune fuite et intégrité structurale doit être reconstituée. Dans ce cas-ci il est probable qu'avec la préparation extérieure appropriée l'application d'une surenveloppe de matériaux composite arrêtera davantage la détérioration ;
- ▶ endommagements externes tels que des bosselures, gouges, se rongeannt où l'intégrité structurale doit être reconstituée.
- ▶ perte interne en métal par la corrosion ou l'érosion (ou une combinaison de la corrosion et de l'érosion), et il y a un besoin de reconstituer l'intégrité structurale. Dans ce cas-ci il est probable que la perte interne en métal continuera et l'évaluation des endommagements et de l'option de la réparation par composite doit tenir compte de ceci.

Toutes les méthodes de réparation considérées doivent être capables du fonctionnement jusqu'à 60°C pour les périodes au-dessus d'opération. Cependant, comme tous les systèmes de résine considérés sont traités à la température ambiante, l'utilisation au-dessus de cette température devrait être traitée avec soin [21].

Les réparations par matériaux composites (renforcement par tissu) peuvent être une bonne alternative à l'installation de soudure, des douilles de plein-encerclement pour la réparation des canalisations de transmission de gaz. Ces réparations se composent

typiquement d'un renfort sous forme de fibres noyées dans une matrice polymère (résine) métallisé dans le pipe par un adhésif. Le remplisseur adhésif est appliqué au défaut avant l'installation pour permettre le transfert de charge à la matière composite. L'avantage primaire de ces produits de réparation au-dessus de souder, des douilles de plein-encerclement est le fait que la soudure est exclue. Une illustration du dispositif de l'utilisation du matériaux composites de tissu-renforcé, Clock Spring, est montrée sur la figure I.19.



Figure I.19. Dispositif de Clock Spring pour la réparation de canalisation.

Clock Spring est un système en trois parties ;

- structure de composite unidirectionnelle.
- système adhésif en deux parties à rendement élevé.
- composant de propriété industrielle de transfert de charge [23].

Trois caractéristiques doivent être considérées en concevant le renforcement par fibres: type de fibre (verre, carbone, ou aramide) ; forme de fibre (typiquement boudinage, remorquage, natte, ou tissu tissé) et orientation ou architecture de fibre. Le renfort peut être orienté dans n'importe quelle direction désirée par le concepteur. Le problème est de déterminer la praticabilité d'employer des matériaux composites comme alternative de réparation pour les canalisations à haute pression. Des critères de conception pour le système de réparation ont été élaborés tôt dans le programme [24].

La réparation doit :

- non intrusive
- applicable aux canalisations en service.
- permanent.
- rentable.
- entièrement prévisible et vérifiable par la modélisation et les équations définitives.
- éliminer toutes les variables d'installation.
- efficace dans tous les endroits et environnements.
- efficace pour toutes les catégories et tailles de pipe.
- répondre ou dépasser aux exigences courantes de code.
- éliminer la technique et la conception de terrain.
- reconstituer conservativement le pipe à sa force originale [24].

La corrosion externe peut également être réparée par cette méthode en appliquant l'adhésif au défaut et en enveloppant une matière composite de renforcement- tissu autour du diamètre extérieur de la canalisation [25].

1.7.1. Types de réparation par matériaux composites

Les types de réparation par composite tombent dans 2 types génériques : bandage et machiné. Le type de réparations de bandage implique l'application du matériau, souvent sous la forme préemballée, qui peut être tenue comme article courant de réparation et peut être appliquée par le personnel d'entretien sur le service. Le type de réparations machiné sont spécifiés et conçu et la réparation effectué par des entrepreneurs spécialisé.

Toutes les réparations impliquent l'application d'une surenveloppe aux secteurs endommagés ou défectueux afin de renforcer la résistance/intégrité de la paroi du pipe. Ceci peut comporter la production sur place d'un stratifié - une combinaison d'un réseau de renfort fibreux et d'une matrice polymère thermodurcissable qui est sujette plus tard à un processus de traitement chimique - ou l'utilisation d'une douille composite préformée qui est enroulée autour du pipe et collée par un adhésive au pipe et sur les enveloppes ultérieur. Dans la situation où la perte externe en métal est réparée, les applications de réparation qui utilisent une douille composite préformée doivent également impliquer l'application d'une certaine forme de remplisseur de transfert de charge au secteur endommagé avant l'application de la douille composite.

1.7.2. Conseils de conception

Une attention particulière doit être accordée à la dégradation possible d'un matériau composite de réparation par la lumière UV. Il y a deux approches principales utilisées pour la conception d'une enveloppe composite, la différence principale étant si on permet au pipe originale de dépasser sa conception originale permise. Alors que pour les renforts en verre qui sont de tissu ou de type de matre aléatoire il est peu probable que la réparation sera conçu tels que l'acier dépasse le rendement. Dans ce cas c'est la part de charge entre le composite et l'acier qui est l'issue de conception principale.

Pour les matériaux composites à fibre continus de verre ou de carbone, le plein avantage de la réparation ne peut être réalisé à moins qu'on permette au système de fonctionner aux contraintes relativement élevées. Ici on suppose que la contribution de l'acier a supporté la charge dans la section réparée peut être négligé afin d'évaluer la contribution du pipe en acier endommagée à l'intégrité de réparation.

Les procédures de conception pour le stratifié de réparation suivent ceux qui sont bien établis dans la fabrication des composites où le principe est de limiter les déformations des matériaux au-dessous du point où les endommagements sont engendré. Tandis que c'est bien au-dessous des charges ultimes qu'il est considéré nécessaire pour le travail à long terme (fatigue). L'approche de conception utilisée dans l'évaluation de la réparation doit tenir compte de toutes les charges appliquées et de la capacité de l'enveloppe composite de supporter ces derniers d'une manière satisfaisante. Dans certains systèmes de réparation le renfort est préférentiellement orienté circonférentiellement et dans cas il y a une limitation de supporter la charge dans la direction axiale. Pour les systèmes de pipe complexes où les efforts axiaux peuvent être significatifs et où il y a suffisamment de métal de base pour supporter ces charges, les options alternatives de réparation qui ont le cercle semblable et les contraintes axiales devront être considérées [21].

I.8 Aspects importants des réparations

I.8.1 Préparation de surface

La préparation extérieure du pipe à réparer est l'aspect le plus important simple dans l'accomplissement d'une réparation réussie. Pour les réparations des pipes en acier au carbone il est normalement possible à réaliser un raccordement collé durable avec l'abrasion mécanique comme l'unique activité de préparation extérieure. Il est important, donc, que la nature de la technique d'abrasion soit entièrement spécifiée (selon la norme suédoise SA3). Il est également important d'aborder les risques de santé et de sécurité liés au processus de nettoyage de souffle (blast cleaned) lui-même.

I.8.2 Traitement de stratifié de réparation

Le traitement d'un stratifié de réparation est fortement influencé par la température et le mélange correct des constituants de résine avant la stratification. Il est important, donc, que les conditions de température dominante soient considérées. Avec l'application de la température limite et d'un certain niveau de catalyseur de résine, comme recommandé par les fournisseurs, ne doit pas être effectué sans recours aux fournisseurs pour plus d'informations.

I.8.3. Documentations des données nécessaires

Pendant l'ordre d'un fournisseur de matière composite pour spécifier correctement une option proposée de réparation, l'opérateur devrait fournir les informations suivantes :

- pression d'emploi, y compris les conditions de dérèglement;
- obligation de la température, y compris les états de renversement ;
- processus, y compris des constituants de trace ;
- charges induites par pression agissant sur le pipe;
- temps requis de la vie de la réparation.

I.8.4. Inspection des réparations par composite

L'enveloppe GRP (Glass Reinforced Plastic) est favorable à l'inspection visuelle et l'entrée d'un fluide dans l'enveloppe ou à l'interface entre elle et l'acier peut être vue, en particulier si des remplisseurs ou des colorants inutiles sont exclus du matériau de réparation. Des méthodes ultrasoniques seraient efficaces pour localiser des décollements entre la réparation et le pipe. Des ultrasons dans la gamme 0,5 MHz à 1 MHz sont habituellement employés.

L'examen du pipe originale sous la réparation n'est pas franc car l'atténuation à la réparation à l'interface du pipe rendra difficile l'utilisation des ultrasons conventionnels. De nouvelles techniques pourraient être employées telles que le CHIME (Creeping Head Wave Inspection Method) (méthode principale d'inspection de vague de rampement) où le plein volume du pipe peut être examiné à l'aide des sondes placées en dehors de la réparation. D'autres méthodes telles que la thermographie passagère ou les courants de Foucault de basse fréquence ont pu être utiles, mais pas sans élément du développement dans le domaine. Alternativement, pour des applications critiques, des capteurs ultrasoniques montés sur un circuit imprimé flexible ont pu être placés sur la pipe avant l'application de la réparation et sont partis in situ [21].

I.9. Conclusions

Le tableau I-5 (ci-dessous) fournit un résumé des possibilités de pression, de la température, de la taille et de la longévité de la gamme des éléments de réparations du pipe discutés dans ce chapitre.

Tableau I.5. Possibilités de divers éléments de réparation pour la température, taille et pour la longévité.

élément de Réparation	Estimation de la pression Maximal	La gamme de température	Taille de l'élément de réparation (diamètre nominal)	Réparation provisoire ou permanent
Bride de pièce rapportée (Figure I.13)	7 bar (100 psi)	Dépend du joint du matériau	0,5'' à 42'' (13 à 1000 mm)	Provisoire
Bride de trou d'épingle (Figure I-14)	140 bar (2000 psi)	Dépend du joint du matériau	0,5'' à 48'' (13 à 1200 mm)	Provisoire
douille d'encerclement (Figure I.15)	La même estimation/taille que la tuyauterie originale			Permanente
douille Époxyde remplie (Figure I.17)	100 bar (1450 psi)	3°C à 100°C	Mêmes tailles en tant que la tuyauterie originale	Permanente
Réparation par matériau composite (Figure I.18)	50 bar (725 psi)	-20°C à +60°C	Tous les diamètres	Provisoire et permanente

1- La limite supérieure de pression se rapporte à de petites tailles/diamètres.

2- Les estimations de pression d'association standard américaines (ASA) rapport aux estimations primaires de pression de service, en pounds par pouce carré (psi), à la température maximale de service de 850°F de (455°C). Par exemple, ASA 600lb se rapporte à un pression maximal non-choquant de fonctionnement de 600 psi (41 bar) à 850°F de (455°C).

3- Les températures plus élevées sont réalisables en injectant les mastiques de marque déposée.

4- La NACE satisfait des valeurs d'impact standard de MR0175 et de CHARPY pour des matériaux de connecteur exposés aux fluides de processus. Des possibilités plus élevées de la température peuvent être réalisées en employant des arrangements de cachetage en métal/graphite (les conceptions feu-sûres).

5- pour des réparations provisoires que la température ambiante supérieure peut être étendue à 90°C dû au degré traiter expérimenté à l'influence de la température [21].

Pour toutes les réparations de pipe, l'opérateur doit exécuter une évaluation des risques structurée qui inclut la considération de tous les futurs mécanismes potentiels d'endommagement ou de détérioration. Le rendement de cette évaluation des risques sera typiquement les spécifications des activités nécessaires d'inspection et d'essai, et des périodicités associées, pour assurer le but continu. Le principe de réparation lui-même peut être bien considéré comme étant une réparation permanente (un élément de réparation qui est prévu pour rester en place pendant la vie restante du système de tuyauterie), mais peut exiger l'examen périodique. C'est particulièrement important quand des réparations ont été eues les moyens à un système de tuyauterie sûreté-critique, où il y a un besoin de démontrer que le système rester en la bonne réparation et bonne état.

Chapitre 02

Modélisation du comportement des pipelines

Modélisation du comportement des pipelines

II.1. Introduction

Le niveau de contrainte dans un pipeline déformé a été inclus ces dernières années dans l'évaluation de la sévérité des bosselures afin de réparer effectivement les endommagements mécaniques dans les canalisations. Les données de haute résolution de calibre fournissent la forme précise de bosselure qui peut être employée pour la détermination des contraintes on utilise des programmes commerciaux utilisant généralement la méthode des éléments fini (MEF) ou des programmes analytique tel que le B31G etc. Cependant, ces programmes sont conçus pour résoudre une série de problèmes généraux. La profondeur d'une bosselure n'est pas le seul facteur déterminant conduisant à la rupture des pipelines malgré quelle présente une probabilité plus élevée des endommagements mécaniques provoquée par l'équipement d'excavation. D'autres phénomènes sont inclus dans l'évaluation des pipelines telle que : la présence des endommagements mécaniques (fissures, gouges), perte de métal, proximité aux soudures, endroit sur la circonférence de pipe.

Ce chapitre contient une étude mathématique ou analytique afin de formulé et résoudre les problèmes de gonflement de tube sans défaut et avec des endommagements (fissure, corrosion) et les théories de leurs réparations par matériaux composites. De plus, les lois ou les théories présentées dans ce chapitre sont probablement utilisées par le logiciel de calcul de structure ANSYS adopté et utilisé dans le quatrième chapitre.

Nomenclature

r_i : rayon intérieur du pipe

r_θ : rayon externe du pipe qui est égale au rayon interne de l'enveloppe composite

r_e : rayon externe de l'enveloppe composite

p_i : pression interne appliquée au système

p_c : pression de contact entre la pipe et l'enveloppe composite

σ_r, σ_θ : respectivement, les contraintes radial et tangentiel de l'enveloppe composite

u_r : déplacement radial dans l'enveloppe composite

E_θ, E_r : respectivement les modules de Young dans la direction tangentielle et radiale de l'enveloppe composite

$\nu_{r\theta}$: coefficient de Poisson ; rapportant la contraction dans la direction circulaire à la prolongation dans la direction radiale

E : module de Young du matériau de base du pipe

σ_y : contrainte de fléchissement du matériau de base du pipe

- K : coefficient de résistance en plastique du matériau de pipe
- N : l'exposant de durcissant du matériau de pipe par rapport à la durée de vie du pipe sans renfort
- σ_{Max} : critère maximal donné de contrainte circonférentielle dans la pipe
- $(Pc)_{Min}$: limite de la pression de contact entre la pipe et la douille
- $(re)_{Min}$: limite du rayon externe de la douille composite
- \hat{u} : déplacement radial de la surface externe du pipe due à la pression interne
- P_{apl} : pression à laquelle le pipeline a été soumis quand le renfort est appliqué
- K_I : Facteur d'intensité de contrainte
- a_0 : longueur initiale de la fissure semi-elliptique
- a_c : longueur critique de la fissure semi-elliptique dans le pipe sans renfort
- $C_{,m}$: paramètres du matériau du pipe
- \bar{a}_c : longueur critique de la fissure semi-elliptique dans le pipe renforcé

II.2. Contrainte et déformation dans les cylindres

Les récipients ou cuves sous pression, les cylindres hydrauliques, les canalisations sous pression, l'armement (canons ...) sont des exemples d'enveloppes minces ou épaisses soumises à des contraintes radiales et tangentielles en fonctions du rayon.

II.2.1. Rappels concernant les enveloppes ou cylindres minces

Pour différencier enveloppes minces et épaisses, on a approximativement :

- enveloppes minces : $\frac{d}{e} = \frac{2r}{e} > 40$
- Enveloppes épaisses : $\frac{d}{e} = \frac{2r}{e} < 40$

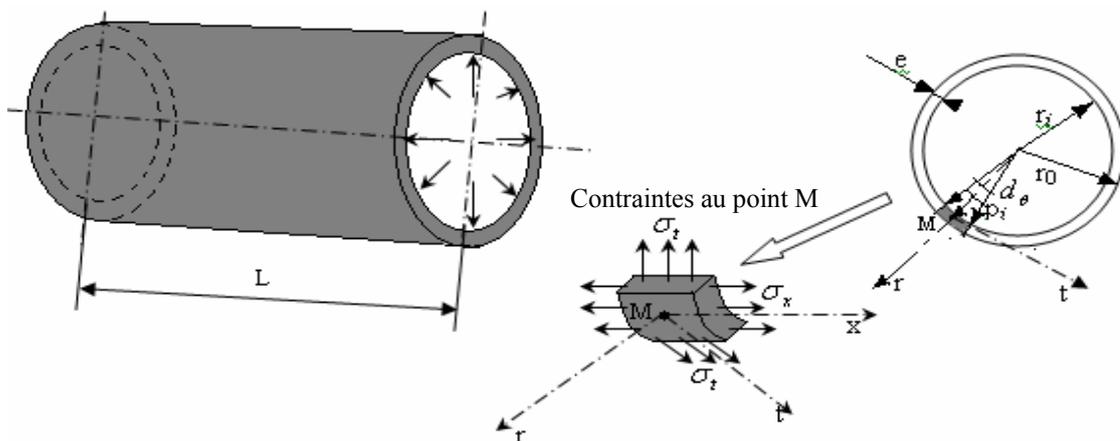


Figure II.1. Enveloppes ou cylindres épaisses soumises à une pression.

II.2.2 cas d'une pression interne P_i et externe P_o de tube

***Contraintes** : en utilisant la loi de Hooke généralisée, l'équilibre d'un élément donne un état de contraintes planes et défini par :

$$\sigma_r - \sigma_t + r \frac{d\sigma_t}{dr} = 0 \quad (\text{II.1})$$

Après intégration on obtient les contraintes au point (M) situé à r du centre du pipe :

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2 - p_0 r_0^2 - (p_i - p_0) \left(\frac{r_0 r_i}{r} \right)^2}{r_0^2 - r_i^2} \quad (\text{II.2})$$

$$\sigma_t = \frac{p_i r_i^2 - p_0 r_0^2 + (p_i - p_0) \left(\frac{r_0 r_i}{r} \right)^2}{r_0^2 - r_i^2}$$

$\sigma > 0$ indique un état de traction, $\sigma < 0$ une compression [26].

Déformation : la déformation total de la circonférence de rayon r est $\delta t = 2\pi r \varepsilon_t$ pour le rayon r correspondant, la déformation radiale (δr) est égale à $r \varepsilon_r$. En utilisant la loi de Hooke généralisée, on obtient [26] :

$$\varepsilon_t = \frac{\delta r}{r} = \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \sigma_r) \quad (\text{II.3})$$

$$\delta r = \varepsilon_t r = \frac{r}{E} (\sigma_t - \nu \sigma_r) = \frac{r(1-\nu)(p_i r_i^2 - p_0 r_0^2) + (1+\nu)(p_i - p_0) \frac{r_0^2 r_i^2}{r}}{E(r_0^2 - r_i^2)} \quad (\text{II.4})$$

II.2.3. Cas d'une pression interne P_i seule

Contrainte : La pression extérieure P_0 est nulle et les formulations précédentes des contraintes en (M) se réduisent à :

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r} \right) \quad \sigma_x = \sigma_L = \frac{p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \quad (\text{II.5})$$

$$\sigma_t = \frac{p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r} \right)$$

Contrainte axiale (résultat de la pression intérieur seul) :

$$\sigma_x = \sigma_L = \frac{p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \quad (\text{II.6})$$

σ_t est une contrainte de traction (>0) σ_r une contrainte de compression (<0)

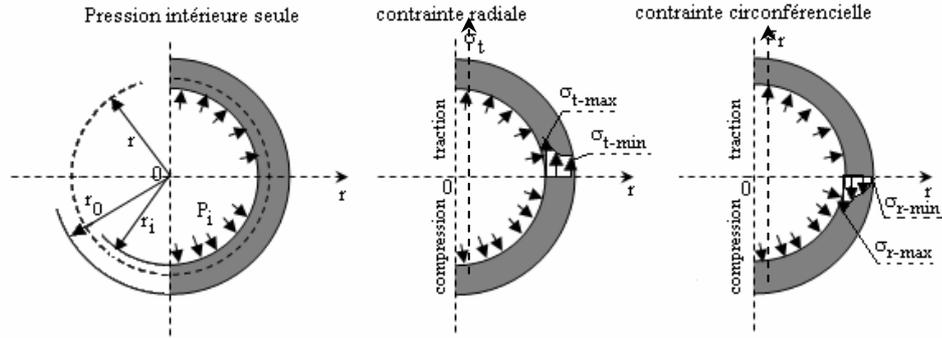


Figure II.2. Sollicitation d'un pipe à une pression interne.

Tableau1. Description des contraintes et des déformations dans les parois du pipe.

$p_i \neq 0$ et $p_0 = 0$	σ_r	σ_t	δ_r
Valeur minimale Pour $r = r_0$	$\sigma_{r-\min i} = 0$	$\sigma_{t-\min i} = \frac{2p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2}$	-
Valeur maximale Pour $r = r_0$	$\sigma_{r-\max} = -p_i$	$\sigma_{t-\max i} = \frac{p_i (r_0^2 + r_i^2)}{r_0^2 - r_i^2}$	$\delta_{t-\max i} = r_i \varepsilon_t$ $\varepsilon_t = \frac{p_i}{E} \left(\frac{r_0^2 + r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} + \nu \right)$

Remarque : si $[e = r_0 - r_i \ll r]$, on retrouve le cas des enveloppes minces avec $\sigma_t = \frac{p_i r}{e}$

***Déformation** La déformation dans une paroi de pipe ‘pipewall’ a deux composantes principales: longitudinale et circulaire. Chacune d'elle peut être encore séparé en déformation en flexion et en membrane. La déformation en membrane est constante à travers l'épaisseur, alors que la composante de flexion change linéairement de l'intérieur de la surface jusqu'à l'extrémité externe. La difficulté principale est dans la détermination des déformations en membrane, car le calcul du composant de flexion est assez direct (facile). La déformation de flexion maximale à travers l'épaisseur du pipeline est simplement proportionnelle à l'épaisseur de la paroi et à la courbure de la bosselure. Les courbures dans les directions axiales et circulaires sont calculées directement à partir de la forme mesurée de bosselure.

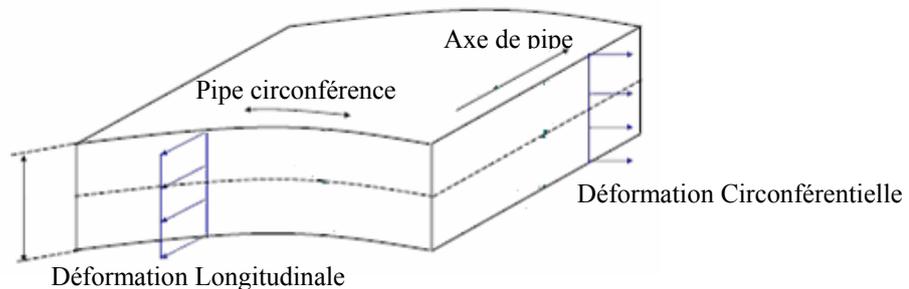


Figure II.3. Composantes de déformation dans le pipeline.

Les déplacements radiaux obtenus à partir des outils intégrés de calibrage sont habituellement affectés par les erreurs de mesure aussi bien que l'irrégularité de la surface (paroi) du pipeline qui doit être éliminée avant le calcul des déformations. En raison d'une petite distance de prélèvement dans les outils de haute résolution, même les petites erreurs

dans des mesures radiales présentent de grandes erreurs de courbure. Par conséquent, le filtrage des données de calibrage est absolument nécessaire pour le calcul précis de la déformation de flexion. Il produit également une forme plus réaliste de la bosselure qui aide à obtenir des déformations plus précises en membrane. En ce qui concerne le calcul des contraintes en membrane les techniques existantes sont limitées à la contrainte longitudinale, et elles sont très imprécises ou inefficaces. En outre, le calcul des déformations longitudinales était très simpliste, mais sur l'analogie plutôt insatisfaisante aux déformations radiales dans un plate circulaire.

II.3. Equations fondamentales

Afin de calculer les contraintes en membrane dans le pipe il est nécessaire de connaître les deux composantes demeurant du vecteur de déplacement près du déplacement normal w (Figure.II.4), c'est-à-dire les déplacements tangentiels u et axial v suivant l'axe x et la direction circulaire y , correspondantes. Par conséquent, il est nécessaire de développer un algorithme pour le calcul des déplacements u et v basés sur le déplacement normal w , qui est la seule information mesurée sur la géométrie de la bosselure. L'approche proposée est décrite ci-dessous.

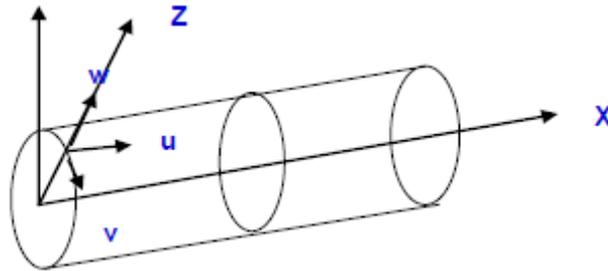


Figure II.4. Déplacements en coordonnées cylindrique d'un pipe.

Les rapports de contrainte-déplacement en membrane pour la grande déformation d'une coque cylindrique sont [27] :

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^m &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^m &= \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (\text{II.7})$$

Où ε_x^m et ε_y^m sont les déformations axial suivant l'axe x , et circulaire suivant la direction y ,
 γ_{xy} la déformation de cisaillement dans le plan $x y$.

R est le rayon moyen du pipeline.

ε_x^0 , ε_y^0 , sont les déformations initiales dues à la pression et à la dilatation thermique, etc.
dans la pipe.

Les équations (II.7) peuvent être présentées sous la forme matricielle :

$$\{\varepsilon^m\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^m \\ \varepsilon_y^m \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} + \{\varepsilon_0\} \quad \text{Où} \quad \{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \varepsilon_x^0 \\ -\frac{w}{R} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \varepsilon_y^0 \\ \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{Bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Le vecteur $\{\varepsilon_0\}$ peut être traité comme vecteur des déformations initiales, car tous ses composants sont connus.

D'une manière analogue et afin de calculer les déformations en membrane il est nécessaire de déterminer d'abord les déplacements u et v qui peuvent être résolus par l'utilisation des modèles MEF bidimensionnels dont l'équation fondamentale est :

$$[K] \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \{F\} \quad (\text{II.9})$$

$[K]$ matrice de rigidité du système,
 $\{F\}$ vecteur des forces nodales.

Si le déplacement w est connu l'équation (II.9) peut être transformée en :

$$[K_M] \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \{F_M\} \quad (\text{II.10})$$

Où $[K_M]$ est la matrice de rigidité pour un problème de coque en membrane,

$\{F_M\}$ est le vecteur modifié des forces nodales équivalentes. Ce vecteur est une fonction du déplacement connu w , et est calculé comme suit :

$$\{F_M\} = \int_V [B]^T [E] \{\varepsilon_0\} dv \quad (\text{II.11})$$

Où :

$$[B] = \begin{bmatrix} f_{i,x} & 0 \\ 0 & f_{i,y} \\ f_{i,y} & f_{i,x} \end{bmatrix} \quad [E] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$$

E , ν respectivement le module de Young et le coefficient de Poisson,
 $f_{i,x}$, $f_{i,y}$ représentent les dérivés partiels des fonctions de forme $f_i(x, y)$.

L'élément coque rectangulaire bilinéaire a été employé pour modéliser le pipeline. Après avoir résolu l'équation (II.10) pour u et v , les déformations en membrane sont alors calculés à partir de l'équation (II.7) [27].

II.4. Comportement mécanique du tube dans les conditions de service

En ce qui concerne la sollicitation de la conduite en service, il faut tenir compte d'une part de la charge statique due à la pression intérieure, ainsi que de l'influence de la

charge pulsatrice due aux fluctuations de pression et de l'influence de la pose de la conduite.

II.4.1. Sollicitation du corps du tube

Sous l'action de la pression intérieure, la plus haute contrainte est créée dans le sens circonférentiel du tube. La contrainte circonférentielle en membrane ou annulaire est donnée par la relation :

$$\sigma_c = \frac{Pd}{2t} \quad (\text{II.12})$$

Cette relation ne reflète cependant pas l'effort réel dans la paroi du tube. La valeur σ_v , dite contrainte équivalente au sens de Von Mises résulte de la formule suivante d'après l'hypothèse de l'énergie de changement de configuration:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_L^2 - \sigma_L \sigma_c} \quad (\text{II.13})$$

Où :

σ_v , est la contrainte équivalente

σ_c , est la contrainte circonférentielle

σ_L , est la contrainte longitudinale dans le sens de l'axe du tube.

Remarque : La contrainte radiale dans le sens de l'épaisseur pour des dimensions des pipelines usuelles peut être négligée.

II.4.2. Sollicitation de la soudure

Les soudures dans des canalisations se présentent sous différents angles par rapport à l'axe du tube. Il est bien entendu qu'une soudure longitudinale dans un corps de tube, lorsqu'elle est perpendiculaire à la contrainte circonférentielle, elle est soumise à la plus grande sollicitation. Lorsque l'angle par rapport à l'axe du tube varie, la contrainte orthogonale à la soudure dite contrainte normale σ_N varie aussi.

La contrainte normale agissant sur la soudure obéit à :

$$\sigma_N = \sigma_c \cos^2 \varphi \quad (\text{II.14})$$

Avec ($\sigma_L = 0$)

En même temps aussi en tant que fonction de la contrainte longitudinale :

$$\sigma_N = \sigma_c \left(\cos^2 \varphi + \frac{\sigma_L}{\sigma_c} \sin^2 \varphi \right) \quad (\text{II.15})$$

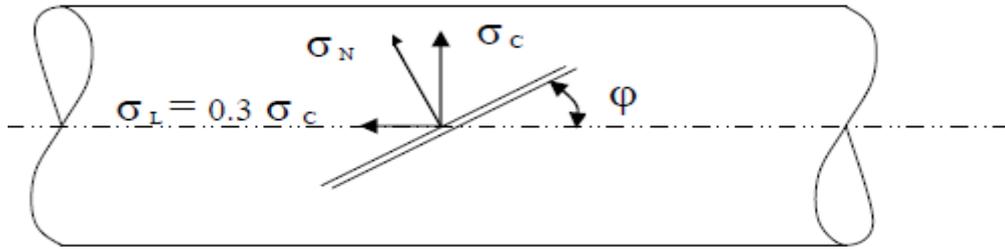


Figure II.5. Sollicitations dans un tube à soudure en spirale.

II.5. Comportement des tubes en spirale dans une canalisation

Le code ASME B 31.3 'ASME code for pressure piping, définit la corrélation.

$$P = \frac{2\sigma_{0,2}.t}{D}.F.E.T \quad (\text{II.16})$$

Où :

P : Pression calculée prévue, qui ne doit pas être dépassée celle de l'exploitation d'un pipeline.

$\sigma_{0,2}$: Limite élastique du matériau.

t : Epaisseur nominale.

D : Diamètre nominal.

F : Coefficient de sécurité.

E : Facteur de joint ($0,8 \leq E \leq 1,0$)

T : Coefficient qui tient compte de la variation de la limite élastique en fonction de la température.

II.5.1. Comportement sous pression intérieure statique

Pendant la phase de lancement du tube spirale destiné aux hautes pressions, des réserves ont été émises sur la longueur plus grande de la soudure spirale par rapport à la soudure longitudinale. Certes, la longueur de la soudure est un facteur important et la contrainte agissant sur la soudure, dite contrainte normale σ_N , est plus faible, du fait de l'angle de la soudure. Ceci a été confirmé par des mesures à l'aide des jauges de contraintes dans le sens circonférentiel et orthogonal à la soudure, sur une virole de tube spirale [16].

$$\begin{aligned} \sigma_N &= \frac{E}{1-\mu^2} [\varepsilon_\alpha (1 + \mu \cot^2 \varphi) + \mu \varepsilon_c (1 - \cot^2 \varphi)] \\ \sigma_c &= \frac{E}{1-\mu^2} [\varepsilon_c (1 - \mu \cot^2 \varphi) + \mu \varepsilon_\alpha (1 - \cot^2 \varphi)] \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

ε_α : Déformation dans la direction normale à la soudure ($\alpha = 90 - \varphi$)

ε_c : Déformation dans la direction circonférentielle.

II.6. Analyse des systèmes de renforcement par enveloppe en matériaux composites pour les pipelines métalliques avec imperfections ou endommagements localisés

Cette section est concernée par l'analyse des systèmes renforcés par matériaux composites pour les canalisations métalliques subissant les déformations élastiques ou non

élastiques avec les imperfections ou les endommagements localisés qui dégrade les services. Dans ces systèmes, une éprouvette de tubes est renforcée par enveloppement avec les enroulements concentriques de la matière composite. L'objectif principal est de développer une méthodologie aussi simple et permet de définir l'épaisseur nécessaire de la matière composite pour assurer : (a) la sûreté des réparations sous conditions opérationnelle et/ou (b) extension de la durée de vie d'exploitation pour différentes situations d'endommagements.

Des exemples au sujet de l'utilisation du renfort composite dans différentes situations d'endommagements sont présentés et analysés montrant les possibilités d'une utilité pratique de la méthodologie proposée dans la conception des systèmes plus sûrs et plus fiables de réparation.

II.6.1. Modèles de base - pipe sans endommagements localisés

Dans cette première étape une méthode d'analyse simplifiée des systèmes renforcés par douille en composite, aucune imperfection ou endommagement localisée n'est considérée. Le système pipe-douille en composite est modelé en tant que deux cylindres concentriques, s'ouvre aux extrémités, sous la pression interne - une paroi mince interne avec un comportement élasto-plastique et une douille ayant un comportement élastique orthotrope. Le cylindre interne a un rayon interne r_i et rayon externe r_0 .

Le cylindre peut être considéré comme parois minces si l'épaisseur de paroi est moins de 1/10 du rayon interne ($(r_0 - r_i) < r_i/10$). La douille a un rayon interne r_0 et un rayon externe r_e . Le système est soumis à une pression interne P_i (Figure II 6). La pression de contact entre le pipe et la douille sera notée P_c .

Supposant que le déplacement radial dans la surface de contact est le même pour les deux cylindres, il est possible d'obtenir des expressions analytiques pour les champs de contrainte, déformation et déplacement. Avec ces expressions, il est possible d'obtenir l'épaisseur minimum de douille composite afin de vérifier un critère de sûreté donné. Différents mécanismes d'échec (plasticité, rupture d'éclat) peuvent être considérés.

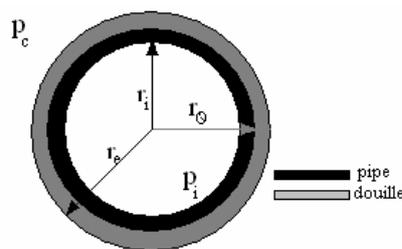


Figure II.6 : Pipe et douille avec de la pression interne.

Généralement la résine époxyde renforcé par des fibres unidirectionnel continu sont employés pour la douille composite.

Négligeant la diminution de concentration des contraintes du polymère composite en fonction du temps qui due à l'environnement, l'expressions analytique de contrainte radial σ_r , tangentiel (de douille) σ_θ et le déplacement radial u_r dans la douille sont obtenus respectivement par les expressions (II.18, II.19 et II.20) [28]:

$$\sigma_r = B \left(1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) r^{-\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1\right)} + C \left(1 + \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) r^{\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1} \quad (\text{II.18})$$

$$\sigma_\theta = -B \left(1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r^{-\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1\right)} + C \left(1 + \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r^{\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1} \quad (\text{II.19})$$

$$u_r = -B \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r^{-\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}} \left(\frac{1}{E_\theta} + \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \right) + C \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r^{\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}} \left(\frac{1}{E_\theta} - \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \right) \quad (\text{II.20})$$

$$B = \frac{-P_C r_e^{\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1\right)}}{r_0^{-\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1\right)} r_e^{\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1\right)} - r_0^{\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1\right)} r_e^{-\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1\right)}}, C = \frac{-P_C r_e^{-\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1\right)}}{r_0^{\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1\right)} r_e^{-\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1\right)} - r_0^{-\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1\right)} r_e^{\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1\right)}} \quad (\text{II.21})$$

Où

P_C est la pression de contact entre la douille et le pipe,

E_θ et E_r respectivement les modules de Young dans la direction tangentielle et radiale

$\nu_{r\theta}$ coefficient rapportant la contraction dans la direction circulaire à la prolongation dans la direction radiale.

Les composants de contrainte et le déplacement radial dans la douille sont en fonctions de la pression de contact P_C qui n'est pas connu « a priori ». Si la paroi du pipeline est mince, la contrainte σ_θ et le déplacement radial u_r pour le pipe peuvent être rapprochés par les expressions suivantes :

$$\sigma_\theta = \frac{P_i r_i - P_C r_0}{r_a - r_i} \quad (\text{II.22})$$

$$u_r = r \left[\frac{\sigma_\theta}{E} + \left\langle \frac{\sigma_\theta - \sigma_y}{k} \right\rangle^{\frac{1}{N}} \right] \quad (\text{II.23})$$

Où

E est le module d'Young du matériau de pipe,

σ_y contrainte à la limite élastique,

K et N sont des paramètres qui caractérisent le comportement plastique du matériau. K est le coefficient de résistance en plastique et N est l'exposant de durcissement.

Les parenthèses angulaires ont la signification suivante : $\langle x \rangle = \max\{0, x\}$. La limite σ_θ / E et $\left\langle \left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_y}{K} \right)^{\frac{1}{N}} \right\rangle$ correspond respectivement à la déformation élastique et à la limite à la déformation plastique dans le pipe. Généralement, du point de vue pratique, il est important de définir l'épaisseur de la douille afin d'assurer le critère de la contrainte tangentielle maximale dans la pipe.

$$\sigma_\theta < \sigma_{Max} \text{ dans la pipe} \quad (\text{II.24})$$

Dans ce cas, la limite de pression de contact $(P_C)_{Min}$ est obtenue à partir de la condition $\sigma_\theta = \sigma_{Max}$

$$\sigma_\theta = \frac{P_i r_i - (P_C)_{Min} r_0}{r_0 - r_i} = \sigma_{Max} \Rightarrow (P_C)_{Min} = \frac{P_i r_i - \sigma_{Max} (r_0 - r_i)}{r_0} \quad (II.25)$$

Et la limite du rayon externe $(r_e)_{Min}$ peut être obtenue à partir de la condition que le déplacement radial de la surface de contact entre le pipe et la douille doit être identique comme suit :

$$[u_r(r=r_0)]_{pipe} - \hat{u} = [u_r(r=r_0)]_{sleeve} \quad (II.26)$$

où

\hat{u} déplacement radial de la surface externe du pipe due à la pression interne P_{apl} (le pipe a été soumis quand le renfort était appliqué).

$$\hat{u} = r_0 \left[\frac{\hat{\sigma}_\theta}{E} + \left\langle \frac{\hat{\sigma}_\theta - \sigma_y}{K} \right\rangle^{\frac{1}{N}} \right] \text{ avec } \hat{\sigma}_\theta = \frac{P_{apl} r_i}{r_0 - r_i} \quad (II.27)$$

En d'autres termes, la limite du rayon externe $(r_e)_{Min}$ est la racine de la fonction Φ , donné par :

$$\Phi(r_e) = \overbrace{\left[\frac{\sigma_{Max}}{E} + \left\langle \frac{\sigma_{Max} - \sigma_y}{K} \right\rangle^{\frac{1}{N}} \right]}^{[u_r(r=r_0)]_{pipe}} - \hat{u} - \overbrace{\left[-B(r_e) \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r_0^{-\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}} \left(\frac{1}{E_\theta} + \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \right) + C(r_e) \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r_0^{\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}} \left(\frac{1}{E_\theta} - \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \right) \right]}^{[u_r(r=r_0)]_{sleeve}} = 0 \quad (II.28)$$

Il est important de signaler que la douille en composite est censée d'être plus forte que le pipe lui-même et elle n'échouera pas pendant l'opération. La pression interne P_{apl} dans le pipeline quand la douille est appliquée est l'une des variables les plus importantes dans l'application des systèmes de renfort. Si P_{apl} est proche de P_i , le renfort doit être très épais et partagera seulement les contraintes tangentielles avec la douille quand un coup de bélier se produit conduisant à la montée rapide de la valeur P_i .

Le choix de σ_{Max} est très important afin de définir le rôle du renfort de la douille. Le but est de présenter différents choix possibles de σ_{Max} selon les critères d'intégrité du pipe qui doivent être vérifiés en service.

Critère de Von Mises

C'est le critère le plus évident. Le pipe ne sera pas soumis à la déformation permanente si la contrainte tangentielle est plus petite que la contrainte à la limite élastique.

$$\sigma_\theta < \sigma_y \Rightarrow \sigma_{Max} = \sigma_y \quad (II.29)$$

II.6.2. Endommages localisés

Les expressions présentées jusqu'ici sont valables seulement s'il n'y a aucune imperfection ou endommagement localisé dans la section du pipe. Dans cette section, on propose un procédé simple pour expliquer les endommagements localisés. L'idée fondamentale est de supposer que la contrainte tangentielle loin d'une imperfection localisée est approximativement la même que vérifiée dans un cylindre intact sous pression. Puisque le rayon interne est beaucoup plus grand que l'épaisseur (l'épaisseur de paroi est moins de 1/10 du rayon interne, au moins), l'analyse des contraintes en voisinage de la région endommagée peut être exécutée d'une manière conservatrice en considérant un plat infini sous la traction avec une imperfection équivalente (fissure externe ou interne, fissure à travers l'épaisseur, entaille, etc.), comme montré schématiquement dans la figure II.7. Par conséquent, les mêmes équations proposées dans la dernière section sont employées et le problème est réduit au choix proportionné de la contrainte maximale σ_{Max} .

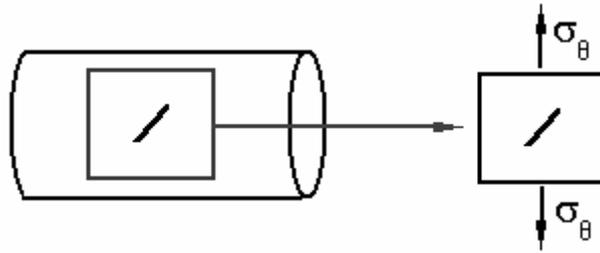


Figure II.7: Problème approximatif.

a). Fissures externes ou internes

Les fissures internes ou externes dans les pipes à parois minces peuvent être approximatives d'une manière conservatrice par une fissure semi-elliptique dans un plat infini suivant les indications de la figure II.7. Le facteur d'intensité de contrainte K_I dans ce cas est donné par la relation suivante :

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left(\frac{M}{\varphi} \right) \quad (II.30)$$

Où $\sigma = \sigma_\theta$, pour une fissure externe et $\sigma = (\sigma_\theta + P_i)$, pour une fissure interne. σ_θ est la contrainte tangentielle défini en (II.21). φ est donné par :

$$\varphi \approx \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8} \left(\frac{a}{c} \right)^2 \quad (II.31)$$

et M est fonction de la géométrie

$$\begin{aligned} M &= M_s M_e \\ M_s &= 1.12 + (1 - 0.75a/c) \\ M_e &= \sqrt{\left(\frac{2e/\pi a}{\pi a} \right) \tan\left(\frac{\pi a}{2e} \right)} \end{aligned} \quad (II.32)$$

Heraldo [28] reporte que Maddox [29] a proposé la formule de M_s (II.32) pour corriger la solution basique d'Irwin considérant un milieu semi-infini. En général la valeur de M_s est adoptée à 1,12. L'expression de M_e est un facteur de correction pour une épaisseur finie proposé par Paris and Sih [30].

Si le pipe est soumis aux cycles répétés de la pression, la fissure peut se propager jusqu'à une rupture brutale (Figure II.8). Supposer la validité de la loi de Paris suivante :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \Rightarrow N = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{(\Delta K)^m} da, \text{ avec } K_{Ic} = \sqrt{\pi a_c} \left(\frac{M(a_c)}{\varphi(a_c)} \right) \quad (\text{II.33})$$

Où

a_0 longueur initiale de la fissure,

a_c longueur critique correspondant au valeur $\Delta K = K_{Ic}$

C et m sont des paramètres du matériau,

Il est possible de prouver la longueur critique \bar{a}_c du pipe avec le renforcement, au moins des temps de λ fois plus grands que valeur critique de a_c si les mêmes équations sont utilisés avec :

$$\begin{aligned} \sigma_{Max} &= \left(\frac{K_{Ic} \varphi(\lambda a_c)}{M(\lambda a_c) \sqrt{\pi \lambda a_c}} \right), & \text{(Fissure externe)} \\ \sigma_{Max} &= \left(\frac{K_{Ic} \varphi(\lambda a_c)}{M(\lambda a_c) \sqrt{\pi \lambda a_c}} \right) + P_0 & \text{(Fissure interne)} \end{aligned} \quad (\text{II.34})$$

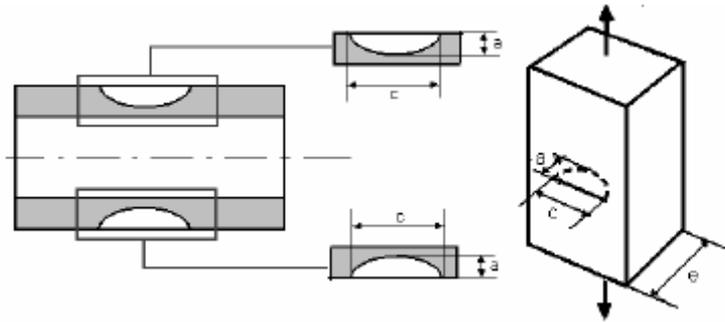


Figure II.8 Approximation d'une fissure externe ou interne dans un cylindre.

Il est également possible de prouver que la durée de vie \bar{N} d'un pipe renforcé est au moins λ fois plus grands que la vie nominale N ($\bar{N} = \lambda N$) si les mêmes équations sont utilisés.

$$\begin{aligned} \sigma_{Max} &= \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/m} \left(\frac{P_i r_i}{r_0 - r_i} \right) & \text{pour une fissure externe} \\ \sigma_{Max} &= \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/m} \left(\frac{P_i r_i}{r_0 - r_i} + P_i \right) & \text{pour une fissure interne} \end{aligned}$$

b) Fissuration en cuvette à travers l'épaisseur de la paroi

Les fissures en cuvette à travers la paroi dans des pipes à parois minces peuvent être approximé d'une manière conservatrice par une fissure de même longueur dans un plat infini sous la traction comme montré dans la figure. II 7. Généralement des pipes transportant des fluides n'ont pas une rupture brutale si la longueur de ce genre de fissure est plus petite qu'une limite donnée (critères de fuite avant coupure). Généralement la taille maximale de la fissure en cuvette à travers l'épaisseur d'un pipeline ne doit présenter de rupture brutale et doit être plus grande que la taille du plus petit défaut détectable. Dans ce cas, après qu'une détection de fuite il y aura du temps de réparation du pipe (de manière permanente ou pas) afin d'assurer son utilité. Le système renforcé par douille en composite doit être conçu, dans ce cas, pour maximiser l'intervalle entre les inspections et pour assurer une durée de vie résiduelle donnée. Les facteurs d'intensité de contrainte sont donnés par :

$$K_I = \sigma_\theta \sqrt{\pi a} \cos^2 \alpha ; K_{II} = \sigma_\theta \sqrt{\pi a} \cos \alpha \sin \alpha \quad (\text{II.35})$$

L'utilisation du critère de contrainte maximal normal permet qu'il est possible de prouver que la direction de la propagation des fissures ne changera pas avec $\alpha = 0$ (seulement mode I). Ce genre de situation ($\alpha = 0$) est le plus grave du point de vue sûreté, il est suggéré de considérer seulement une fissure équivalente avec la même longueur de la vraie fissure mais avec $\alpha = 0$ dans la conception de l'épaisseur proportionnée de la douille de renforcement. Exactement comme dans le cas des fissures elliptiques, si le pipe est soumis aux cycles répétés de la pression (Eq II.33), il est possible de prouver que la longueur critique \bar{a}_c du pipe renforcé est au moins λ fois plus grands que la valeur critique de a_c si les mêmes équations sont utilisés :

$$\sigma_{Max} = \left(\frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi \lambda a_c}} \right) \quad \text{fissure en cuvette à travers la paroi} \quad (\text{II.36})$$

Il est également possible de prouver la durée de vie \bar{N} du pipe renforcé est au moins λ fois plus grande que la durée de vie N ($\bar{N} = \lambda N$) a_c si les mêmes équations sont utilisés.

$$\sigma_{Max} = \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/m} \left(\frac{P_i r_i}{r_o - r_i} \right) \quad \text{fissure en cuvette à travers la paroi} \quad (\text{II.37})$$

***Remarque** : L'étude présentée dans cette section est valide si le rayon ρ de la zone plastique au bout de la fissure est plus petit que 20% de la longueur de la fissure [28].

$$\rho = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_y^2} (1 - 2\nu)^2 < 0.2a \quad (\text{II.38})$$

c). Défauts de corrosion

Les critères les plus utilisés couramment pour l'évaluation des défauts de corrosion sous le chargement interne de pression est une famille des critères décrits dans d'ASME

B31G [37] comme méthodes de secteur efficace. Ceux-ci incluent le critère de RSTENG 0.85 (également connu sous le nom de critère modifié de B31G). Ces critères ont été élaborés à la fin des années 1960 et du début des années 70 pour évaluer l'utilité des lignes de transmission corrodées de gaz. La prétention empirique de base est que la perte de force due à la corrosion est proportionnelle à la quantité de perte en métal mesurée axialement le long du pipe, comme illustré dans Fig.II.9.

La perte en métal est traitée comme un défaut à travers l'épaisseur du pipe. Les méthodes efficaces supposent que le profil de profondeur maximum se situe dans un plan long de l'axe du pipe. Pour adapter à la nature irrégulière la plupart des défauts de corrosion, un profil du défaut est mesuré et les points les plus profonds sont traduits à un plan axial simple pour l'analyse, comme illustré dans Fig. II.9. Ces critères peuvent être exprimés sous la forme suivante :

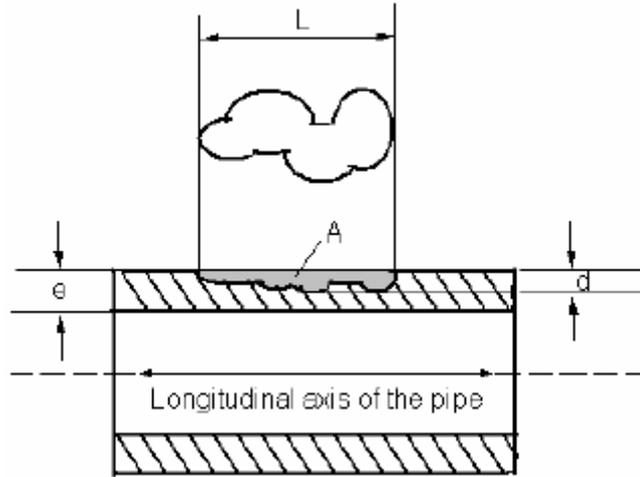


Figure II.9. Perte en métal dans la pipe.

$$\sigma_{\theta} < \bar{\sigma} \left[\frac{1 - A/A_0}{1 - (A/A_0)(M^T)^{-1}} \right] \Rightarrow \sigma_{Max} = \bar{\sigma} \left[\frac{1 - A/A_0}{1 - (A/A_0)(M^T)^{-1}} \right] \quad (II.39)$$

A secteur du défaut dans le plan longitudinal a travers l'épaisseur de paroi,

$A_0 = Le$ est la section originale,

M_T facteur de Folias pour un défaut à travers l'épaisseur de la paroi,

$\bar{\sigma}$ contrainte d'écoulement, qui est un paramètre calculé entre la contrainte à la limite élastique du matériau et sa contrainte ultime. Le critère de B31G [37] peut être exprimé sous la forme suivante :

$$\sigma_{\theta} < 1.1\sigma_y \left[\frac{1 - (2/3)(d/e)}{1 - (2/3)(d/e)(M_1^T)^{-1}} \right]; \quad (II.40)$$

$$M_1^T = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{L}{\sqrt{2r_i e}} \right)^2} \Rightarrow \sigma_{Max} = 1.1\sigma_y \left[\frac{1 - (2/3)(d/e)}{1 - (2/3)(d/e)(M_1^T)^{-1}} \right]$$

Dans le cas $\bar{\sigma} = 1.1 \sigma_y$; $A = (2/3)Le$ le critère B31G pour un emploi simplifiée, deux termes du facteur de gonflement de Folias au lequel s'applique $\left(\frac{L}{\sqrt{2r_i e}}\right)^2 \leq 20.0$ et $d/e < 0.8$.

Le critère modifié de B31G peut être exprimé sous la forme suivante :

$$\sigma_\theta < \bar{\sigma} \left[\frac{1 - 0.85 \left(\frac{d}{e}\right)}{1 - 0.85 \left(\frac{d}{e}\right) (M_2^T)^{-1}} \right] \Rightarrow \sigma_{Max} = \bar{\sigma} \left[\frac{1 - 0.85 \left(\frac{d}{e}\right)}{1 - 0.85 \left(\frac{d}{e}\right) (M_2^T)^{-1}} \right] \quad (\text{II.41})$$

Avec

$$\bar{\sigma} = \sigma_y + 10 \text{Ksi} (68.9 \text{MPa}) \quad (\text{II.42})$$

et

$$M_2^T = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{1 + 0.06275 \left(\frac{L}{\sqrt{2r_i e}}\right)^2 - 0.003375 \left(\frac{L}{\sqrt{2r_i e}}\right)}; \text{pour} \left(\frac{L}{\sqrt{2r_i e}}\right)^2 \leq 50 \\ 0.032 \left(\frac{L}{\sqrt{2r_i e}}\right)^2 + 3.3; \text{pour} \left(\frac{L}{\sqrt{2r_i e}}\right)^2 \leq 50 \end{array} \right\} \quad (\text{II.43})$$

Pour une section longue corrodée la forme rectangulaire est assumée. Le critère est de considérer cela en raison du procédé de corrosion et que le rayon interne est indiqué par $(r_i - d)$, par conséquent [28] :

$$\sigma_{Max} = \bar{\sigma} \left[\frac{e - d}{e} \right] \quad (\text{II.44})$$

II.7. La norme de réparation ASME

Une directive développée récemment pour déterminer l'épaisseur de l'enveloppe de matériau composite pour des défauts de pipe a été considérer comme une norme de réparation ASME "Post Construction Repair Standard" [31]. Dans cette norme l'épaisseur minimal de réparation, t_{repair} , assurant la réparation est appliquée à la pression interne, est déterminée par :

$$t_{repair} = \frac{1}{\varepsilon_c E_c} \left(\frac{PD}{2} - st_s \right) \quad (\text{II.45})$$

Où

ε_c et E_c sont respectivement la déformation agrée, le module d'Young pour le stratifié dans la direction circulaire,

P est la pression interne,
 D est le diamètre externe de pipe,
 s est la limite d'élasticité minimum spécifique (SMYS) du pipe,
 t_s est l'épaisseur de paroi rester au minimum du pipe.

L'équation (II.45) est dérivée pour garantir d'abord un module moyen de combinaison de composite et matériaux du pipe (E_{av}) :

$$E_{av} = \frac{E_c t_{repair} + E_s t_s}{(t_{repair} + t_s)} \quad (II.46)$$

Où E_s est le module élastique de l'acier. $\varepsilon_{elastic}$ la déformation élastique, dans le stratifié qui peut être déterminé par la relation suivant:

$$\varepsilon_{elastic} = \frac{1}{E_{av}} \frac{PD}{2(t_{repair} + t_s)} = \frac{PD}{2(E_c t_{repair} + E_s t_s)} \quad (II.47)$$

Quand substrat du pipe de commence à rapporter la pression interne, P_{yield} , est trouvée en réorganisant l'équation (II.47) avec $P = P_{yield}$:

$$P_{yield} = \frac{2\varepsilon_{elastic} (E_c t_{repair} + E_s t_s)}{D} = \frac{2s(E_c t_{repair} + E_s t_s)}{DE_s} \quad (II.48)$$

Assumant que l'acier du pipe est parfaitement élasto-plastique, car la pression monte au-dessus de P_{yield} le substrat du pipe n'assure aucune autre charge et toute autre charge est portée seulement par le composite. Par conséquent la déformation supplémentaire, $\varepsilon_{plastic}$ dans le composite est donné par :

$$\varepsilon_{plastic} = \frac{(P - P_{yield})D}{2E_c t_{repair}} \quad (II.49)$$

Par conséquent toute la déformation tangentielle ε en fonction de la pression est donnée par la somme des déformations avant et après que la pression à la limite élastique soit atteinte, comme suit:

$$\varepsilon = \varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{plastic} = \frac{P_{yield} D}{2(E_c t_{repair} + E_s t_s)} + \frac{P - P_{yield} D}{2E_c t_{repair}} \quad (II.50)$$

En égalisant déformation total ε à la déformation accidentel du calcul du composite, ε_c , l'épaisseur minimal de la réparation peut être déterminée par l'équation suivante (de Eq. II.45) :

$$\varepsilon_c = \frac{PD}{2E_c t_{repair}} - s \frac{t_s}{E_c t_{repair}} \quad (II.51)$$

Dans la pratique, quand le composite de réparation est utilisé, pendant que le pipe et en service, l'équation II.51 doit être modifié pour prendre en conte la pression interne de service du pipe pendant la réparation (P_{live}) comme suit :

$$\varepsilon_c = \frac{PD}{2E_c t_{repair}} - \frac{st_s}{E_c t_{repair}} - \frac{P_{live} D}{2(E_c t_{repair} + E_s t_s)} \quad (II.52)$$

Dans ce cas-ci, l'épaisseur du stratifié de réparation, t_{repair} , peut être calculée par Eq. (II.52).

Quand un pipe est réparé par une matière composite, la contrainte dans le pipe en service est réduite proportionnellement au renfort fourni par la matière composite. À l'interface, les déformations circonférentielles dans le pipe et le matériau de renfort sont égales. On utilise la compatibilité et les premiers principes, les contraintes circonférentielles *modifiés* dans le pipe sont calculés par la relation suivante [31]:

$$\sigma_{hoop} = \frac{PR}{t_p \left[1 + \frac{E_c t_c}{E_p t_p} \right]} \quad (II.53)$$

Où

σ_{hoop} contrainte circonférentielle du pipe en acier (psi)

t_p épaisseur de la paroi du pipe (inches)

E_p module d'élasticité (de Young) du pipe (psi)

t_c épaisseur du matériau composite (inches)

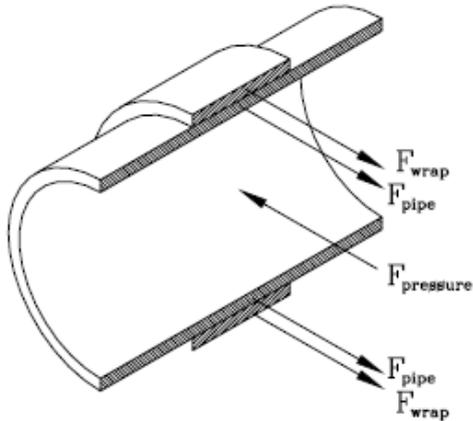
E_c module de Young du matériau composite (psi) [32]

II.8. Utilisation future des réparations par composites

Pour établir la permanence de la réparation, les fabricants et l'industrie devraient conduire des études sur le terrain à long terme (et probablement essai accéléré à court terme pour simuler des conditions à long terme) pour adresser l'exécution à long terme. D'une manière idéaliste, l'évaluation devrait impliquer les pipes enterrées qui sont retirées à intervalles spécifiques et examinées leur éclatement. Bien qu'elle soit commune pour extrapoler des données à court terme, il serait salutaire pour que quelques efforts de recherches réalisent le véritable essai à long terme prévu pendant 10 et même 20 années ou plus.

Les systèmes qualifiés devraient satisfaire les mises à l'épreuve qui exigent que l'exposition fiable d'essais et d'analyses de technologie peut de manière permanente reconstituer l'utilité des canalisations. Tant que des mesures de contrôle de qualité sont prises, il n'y a aucune raison de croire que ces systèmes ne serviront pas comme ils ont été à l'origine prévus. L'industrie est encouragée à s'assurer que des niveaux élevés du contrôle de qualité sont maintenus considérant des matériaux et des techniques d'installation.

Équation définissant la pression de d'éclatement



$$P_{burst} = \frac{\sigma_{ult(pipe)} t_{pipe} + \sigma_{ult(wrap)} t_{wrap}}{r_{inside}}$$

P = Pression intérieur
 σ = Material failure stress
 t = Thickness of material
 r = Radius of pipe

Note : Le calcul ci-dessus est basé sur la théorie des coques à paroi mince et ne s'applique pas pour les pipes à parois épais avec le rapport du diamètre à l'épaisseur de la paroi inférieure à 20.

Figure II.10 Diagramme de corps libre d'un système de pipe réparé par composite [33].

II.8.1. Réparation du pipe ayant une paroi perdu par corrosion

L'enveloppe LLC de la pipe employée par les méthodes décrites dans ASME PCC-2 pour calculer l'épaisseur requise pour l'échantillon de pipe réparé puis testé à l'éclatement. L'équation de PCC-2 est :

$$t_{repair} = \frac{1}{S_c} \left(\frac{P_f D}{2} - S_a t_s \right) \quad (II.54)$$

t_{repair} Épaisseur désirée de la réparation (inches)

S_c contrainte à la traction du matériau composite dans la direction circonférentielle (psi)

P_f pression d'éclatement du pipe sans endommagement (psi)

D diamètre extérieur (inches)

S_a la limite d'élasticité minimal spécifié (SMYS, psi)

t_s l'épaisseur minimale restante de la paroi du pipe (inch)

II.8.2. nombres de couches

Pour des contraintes circonférentielles dus à la pression interne le nombre minimale d'enveloppes, n_A , est donné par [34] :

$$n_A = \frac{PD}{2d_f S_w} \quad (II.55)$$

$d_f = 0,72$ facteur de conception

$S_w = 3,92$ Ksi résistance par pli par mètre (ou par in) dans la traction [35].

II.8.3. Longueur axiale de la réparation

L'épaisseur de calculé du stratifié de réparation se prolongera au delà de la région endommagée dans la pipe par L_{over}

$$L_{over} = 2\sqrt{Dt} \quad (II.56)$$

L_{over} longueur de chevauchement qui doit être au moins 0,05 m (2").

Les bouts de la réparation peuvent être effilés. Une longueur minimum de cône, L_{taper} , approximativement du 5:1 (horizontal : la verticale) est recommandée.

La longueur axiale totale de la réparation est indiquée par :

$$L = 2L_{over} + L_{defect} + 2L_{taper} \quad (\text{II.57})$$

La réparation sera centrée au-dessus du défaut [36].

II.9. Conclusion

Ce chapitre présente un résumé d'une méthodologie simplifiée proposée comme outil dans la conception des systèmes de renforcement par matériaux composites. Cette méthodologie peut être utile dans la définition de la pression de l'application et de l'épaisseur de la douille nécessaires pour assurer la conception des systèmes plus sûrs et plus fiables de réparation.

La prolongation de la méthodologie pour expliquer des endommagements localisés est également simple (des gouges, des bosselures, etc.).

Généralement ces théories supposent que les défauts de corrosion sont émoussés, puisque la rupture s'effectue par effondrement plastique.

Chapitre 03

Elaboration des tubes et caractérisation de leurs matériaux

Elaboration des tubes et caractérisation de leurs matériaux

III.1. Introduction

L'élaboration et la mise en forme des matériaux représentent un secteur économique extrêmement important : de très grandes entreprises multinationales, mais également des PME extrêmement dynamiques. Les propriétés d'emploi des matériaux sont d'un enjeu décisif dans tout le secteur aval (automobile, aéronautique, pipes de transmission des hydrocarbures ... etc.).

Le matériau étudié est un acier X70 développé par Arcelor-Mittal et destiné à la fabrication des pipelines et gazoducs. Etant donné les dégâts considérables que peuvent causer les ruptures de pipelines, par exemple, du point de vue écologique, tout acier destiné à leur fabrication doit, de nos jours, répondre aux caractéristiques mécaniques des matériaux.

Dans ce chapitre, les sujets traités concernent les procédures de fabrication des tubes, le revêtement des tubes et tous les essais mécaniques (traction, pliage, Charpy, dureté) selon la norme ASTM, article A370 – 01 [38], qui caractérise le comportement du matériau utilisé qui est l'acier X70 et concernent aussi les procédures de contrôle de pipes.

III.2. Procède de fabrication des tubes

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

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

On se limitera dans le cadre de cette étude à la présentation du mode de fabrication des tubes dits de grands diamètres et utilisés dans le transport. Cette appellation est réservée aux tubes de diamètre extérieur supérieurs à 406 mm (16"). Ils sont obtenus par formage suivi de l'opération de soudage en *spirale* (Figure III.1).

III.2.1. Tubes soudés en spirale



Figure III.1. Machine de préparation et de formage.

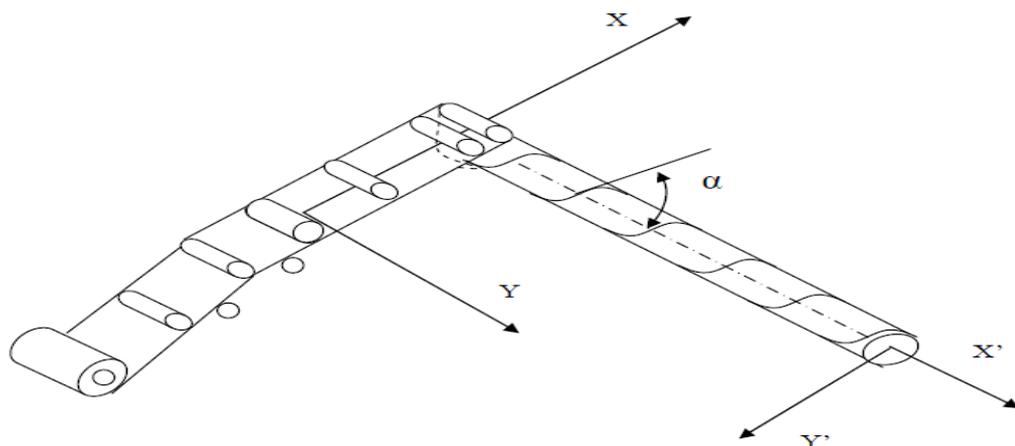


Figure III. 2. Principe de fabrication d'un tube soudé en spirale.

La fabrication des tubes soudés en spirale est réalisée en continu sur des machines à souder. Après déroulement de la bobine en bande par un train d'entraînement, la tôle est poussée dans la cage de formage ou elle subit une déformation de cintrage sous l'action d'un vérin. L'obtention du formage en spirale est réalisé par l'inclinaison d'un angle α entre l'axe initial de la bande et l'axe de sortie du tube, (Figure III. 2).

L'enroulement des tubes en spirale permet d'obtenir des tubes calibrés sans avoir besoin de recourir à des étapes de fabrication supplémentaires telles que l'expansion ou le calibrage. De ce fait, le tube précontraint lors de la phase de pliage, le reste par la suite. Pour des épaisseurs de paroi au dessus de 20 mm, on utilise habituellement des tôles fortes. Ce procédé permet une exploitation économique optimale de la largeur de bande disponible, de par le rapport largeur de bande/diamètre allant jusqu'à environ 2,2.

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

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

Où :

B, est la largeur de la bande ;

D, est le diamètre extérieur ;

α , est l'angle d'introduction de la bande par rapport à la tête de formage.

Les limites théoriques d'angle ne peuvent, en pratique, pas être exploitées. Si l'angle est trop aigu, il s'en suit une instabilité du processus de cintrage. Les valeurs limites, pour la fabrication, sont comprises entre 15° et 50° [16].

La fabrication des tubes spirale peut être subdivisée en opérations principales suivantes :

- La préparation de la bande
- La bande de rabotage
- Le cintrage
- Le soudage
- La parachèvement
- La réception et inspection

La préparation de la bande et des rives de la bande ainsi que des soudures de rabotage influent directement sur la qualité du tube. A cause de l'importance, nous attachons à cette dernière, dans ce chapitre, une attention particulière.

A l'entrée de la machine pour tubes spirale, on effectue les opérations suivantes :

- Déroulage de la bande
- Dressage de la bande de cisailage
- Chanfreinage des rives de la bande
- Cambrage des rives pour éliminer l'effet de toit

A l'entrée de la cage de formage, on effectue la passe intérieure de la soudure alors que la passe extérieure est effectuée sur le tube formé.

Les procédés usuels pour la coupe sont :

- Oxycoupage
- Découpage au plasma

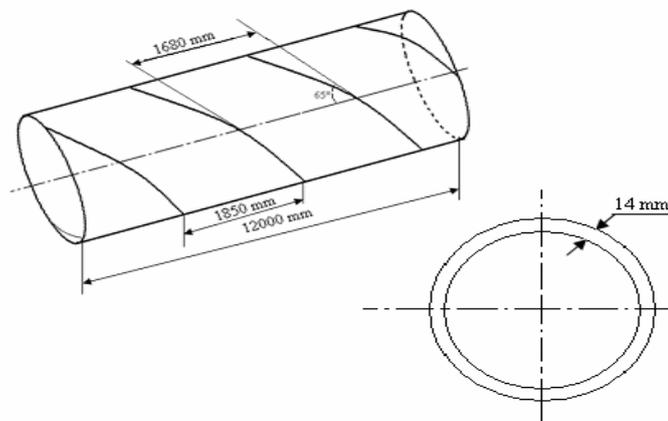


Figure III.3 Informations dimensionnelles d'un tube a l'état final.

III.3. Paramètres de la soudure

D'après le Laboratoire des essais mécanique de ALFAPIPE ANNABA les paramètres de la soudure sont montrés dans le tableau III.1 ci-dessous:

Tableau III.1 Paramètres de soudure.

Paramètre de soudure				Etat de base			
Vitesse de la soudure 0.77 m/min				Nuance	X70	N° Coulée	161714
Intérieure		Extérieure		fournisseur		N° Bobine	7426911
Fil	Φ 4	Flux	223				
I(i)	780/800	I(e)	775/800				
U(i)	33/34	U(e)	33/34	Epaisseur nominal	14.3	Epaisseur réel	14.20

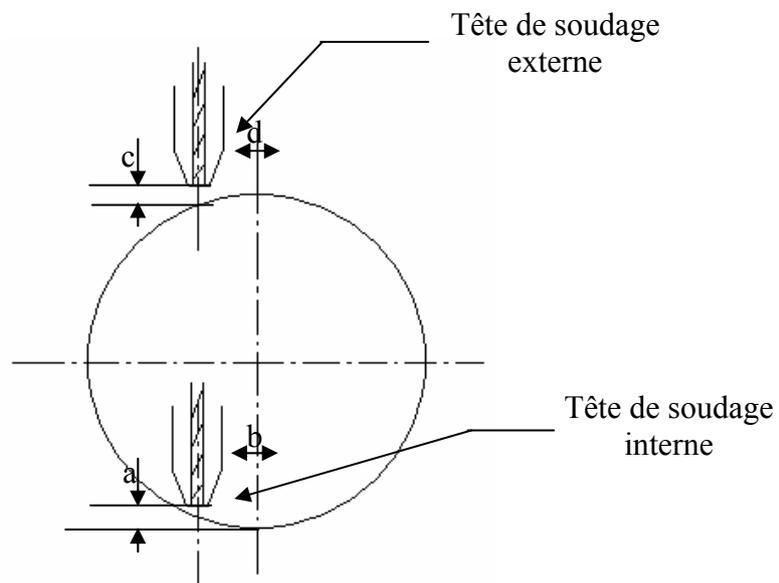


Figure III.4 Emplacement des têtes de soudage.

Tableau III.2 Dimensions des soudures selon l'emplacement de la tête intérieur et extérieur.

Intérieure		Extérieure	
Dimensionnement			
a (mm)	30	c (mm)	30
b (mm)	30	d (mm)	30
Surépaisseur (mm)	3,03	Surépaisseur (mm)	1,42
Largeur (mm)	16,78	Largeur	17,85
Pénétration (mm)	0,72	Pénétration	0,65
Désaxage (mm)		0,35	
Somme des pénétrations (mm)		1,37	

III.4. Introduction sur les propriétés générales du matériau

Les propriétés du matériau auxquelles on s'attache sont les caractéristiques mécaniques déterminées dans des conditions standard par les essais de traction et de choc

(limite élastique E, charge de rupture R, allongement, striction et résilience). Ces méthodes couvrent les procédures et les définitions des essais mécaniques des aciers, des fontes, des aciers inoxydables, et des alliages relatifs. Les divers essais mécaniques ci-dessous décrits sont employés pour déterminer les propriétés exigées dans les caractéristiques de produit. Des méthodes standard d'essais doivent être suivies pour obtenir des résultats reproductibles et comparables. Un acier de construction sera donc défini par sa composition chimique, par ses caractéristiques mécaniques et par sa trempabilité. Les caractéristiques obtenues dans la réalité dépendent à la fois des dimensions des pièces et de la trempabilité de l'acier. Elles peuvent être très différentes de celles qu'indiquent les tableaux et qui correspondent à des conditions standard.

Le choix entre les diverses nuances s'exerce donc en fonction des caractéristiques demandées aux tubes pour résister aux sollicitations auxquelles ils seront soumis. Mais on fait intervenir aussi leur dimension et leur forme, qui imposent le mode de sollicitation.

III.4.1 Le découpage des éprouvettes pour les essais de caractérisation

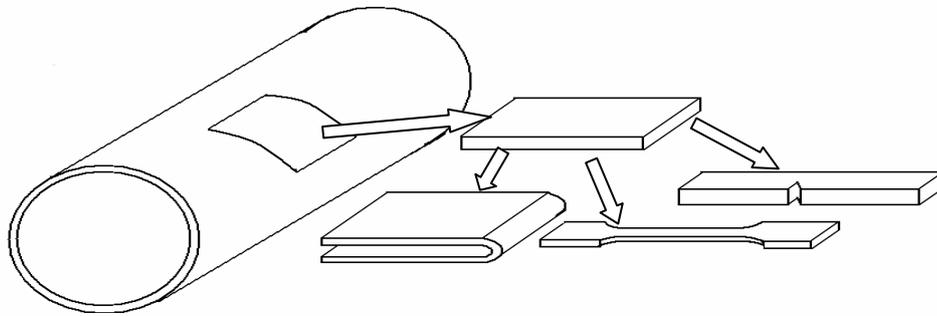


Figure III.5 présentation de la source des éprouvettes des essais.

Après la norme ASTM A 370-01 (édition 2004). Le découpage des éprouvettes à tester pour la connaissance des caractéristiques mécaniques du matériau du pipe est longitudinalement ou transversalement. La forme de la plaque coupée est transférée à la forme plane puis usinée en éprouvettes d'essais [38].

III.4.2. Les essais mécaniques

Les essais mécaniques à étudier sont : Traction, Pliage, Dureté, Impact (Charpy).

III.4.2.1. Essai de traction

a). Description :

L'essai de traction lié à l'essai mécanique des produits en acier soumet une éprouvette usinée ou de plein-section à l'examen à une charge mesurée suffisamment pour causer la rupture. Les propriétés en résultant recherchées sont définies dans la terminologie des normes. Elle consiste à imposer un allongement à une éprouvette de section initiale S_0 et de longueur utile L_0 . La courbe type obtenue pour un matériau ductile est la suivante (Figure III.6):

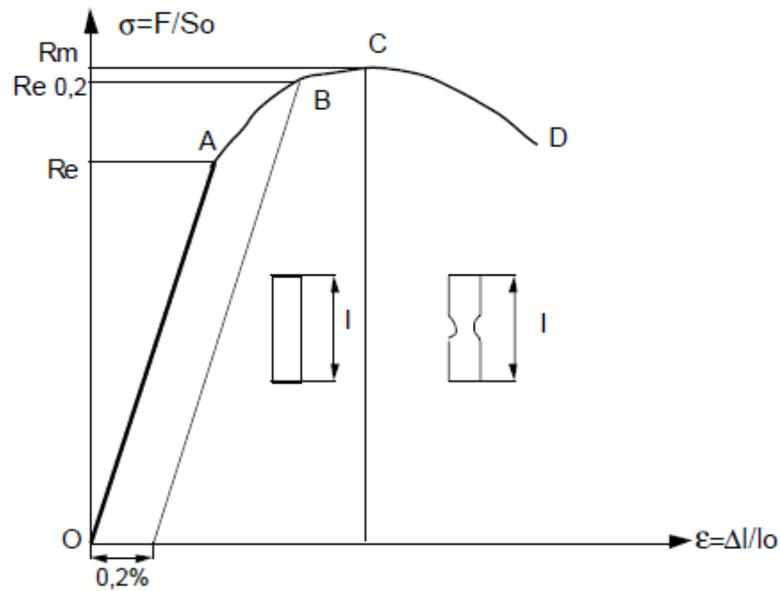


Figure III.6 Schématisation du comportement d'un matériau élasto-plastique.

- La droite OA correspond à la déformation élastique réversible.
- La courbe AC est le domaine de déformation plastique homogène: si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à OA et il reste une déformation permanente.
- Pour CD, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter : cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparaît. En D il y a rupture de l'éprouvette [39].

b). Dimensionnement de l'éprouvette d'essai :

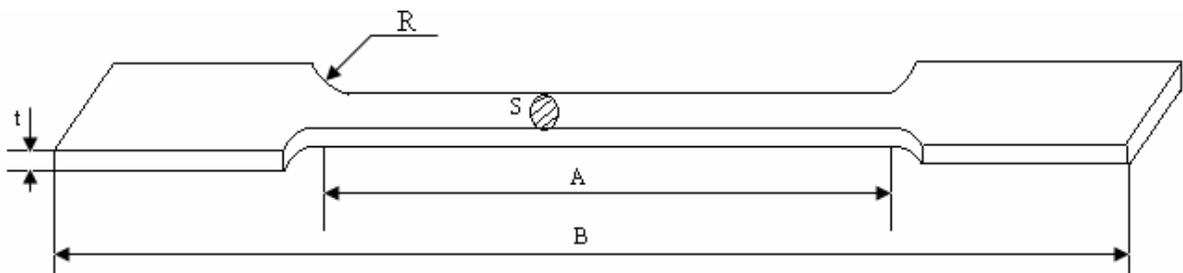


Figure III.7 Description dimensionnelle d'une éprouvette de traction.

L'épaisseur de l'éprouvette est $t = 14,3 \text{ mm}$ (la même épaisseur que le pipe), la section $S = 544,83 \text{ mm}^2$, $A = 57,2 \text{ mm}$, $R = 25,4 \text{ mm}$.

La figure III. 8 représente une machine d'essai est MOHR FEDEHAF (ZWIK) UPD 60.



Figure III.8 Machine d'essai universel et échantillon de traction.

c). Machines d'essais

Une machine multi fonction (traction, flexion, pliage, compression) moderne dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système d'amarrage. Grâce au micro-ordinateurs, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 400 Kn, à l'aide de quelques touches.

d). L'essai :

Le comportement contrainte/déformation des essais de tractions sur des éprouvettes en matériau de base X70 soudé ou non est présenté dans la Figure III.9. Il ressort que les éprouvettes soudées possèdent une contrainte maximale plus importante que celle en matériau de base seulement et que la rupture s'effectue loin de la zone de soudure (Figure III.10).

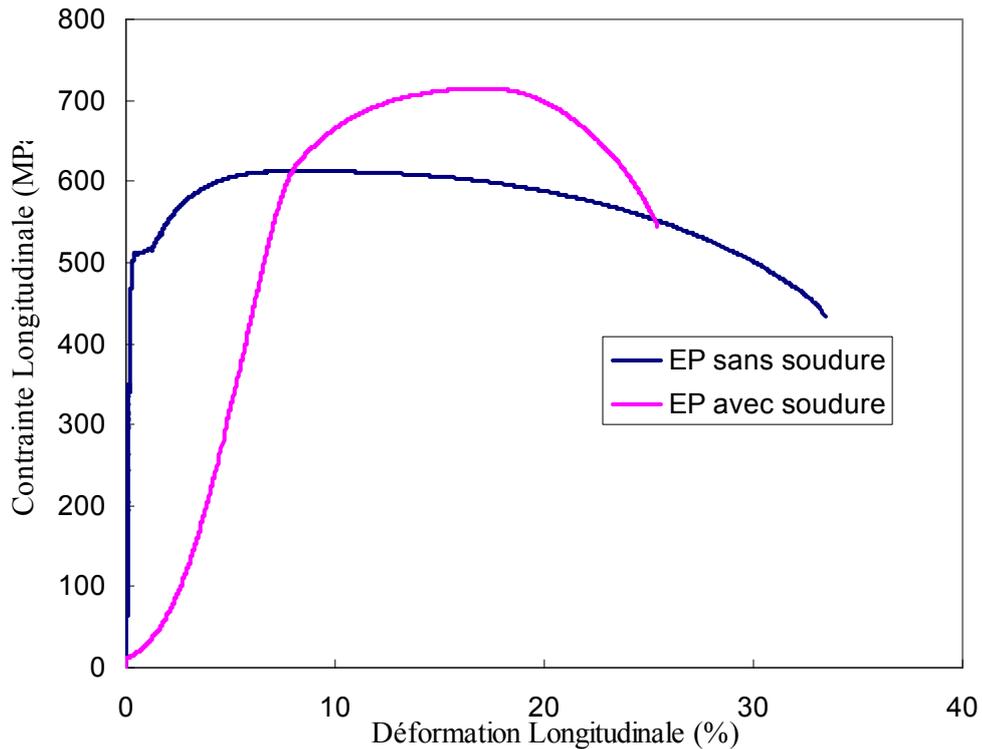


Figure III.9 Traction d'une éprouvette non et soudée d'acier X70.



Figure III.10 Les deux éprouvettes après la rupture.

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et le déplacement, plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ , rapportée dans le diagramme de traction (Figure III.10) est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette (contrainte nominale), et la déformation longitudinale est déterminé par $\varepsilon = \Delta l / l$. Les courbes contrainte/déformation permettent de déterminer :

***Limite élastique conventionnelle $R_{p0.2}$:** La fixation d'un seuil d'écoulement plastique n'est pas possible sans convention car, même à des contraintes largement en dessous de $R_{p0.2}$, on observe à l'aide des instruments hautement précis des déformations irréversibles. Pour la plupart des constructions mécaniques des déformations aussi faibles sont insignifiantes. On préfère donc une limite plus élevée et aussi plus facilement déterminable. Ainsi on fixe la limite conventionnelle d'élasticité à la contrainte maximale applicable qui laisse, après décharge, une déformation permanente (plastique) de 0,2 %. Pour la mécanique de précision les exigences sont plus poussées, et on détermine parfois de manière analogue $R_{p0.02}$. La valeur s'obtient en augmentant graduellement la force de traction jusqu'à ce que après déchargement, l'allongement résiduel atteigne la valeur

cherchée ou on peut aussi tracer une ligne parallèle à la droite élastique passant par $\varepsilon = 0,2$ %

***La résistance à la traction R_m** : C'est la charge appliquée au maximum de la courbe $F = f(\Delta L)$ divisée par la section initiale est égale à la contrainte maximale.

***L'allongement à la rupture A** : C'est la déformation nominale (allongement divisé par la longueur initiale) après rupture exprimée en %. En raison de la localisation de la déformation, la majeure partie de l'allongement ne provient que d'une fraction de la longueur L_0 . La valeur de A est donc d'autant plus petite que l'éprouvette est longue.

Les résultats des essais de tractions des éprouvettes soudé et non soudé obtenu sont récapitulé dans le tableau III.3.

Tableau III.3. Tableau des résultats d'essais de traction.

Légende	Nr	N° de tube	So (mm ²)	Module E (KN/mm ²)	Rp 0.2 (MPa)	Rm (MPa)	Rp0.2/Rm %	ε -Rupture %
	Max				621,00	785,00	87,0	
	Min				483,00	566,00	0,0	
	1	TN C553	544,83	285,4	509,55	612,43	83,6	33,42
	2	TS C553	542,44			655,10	-	0,00

III.4.2.2. Essai de dureté

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux, il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet de norme précise.

- La dureté de Mohs
- La dureté Brinell
- La dureté Vickers
- La dureté Knoop
- La dureté Rockwell B et C

Dans ce travail l'essai de dureté adopté est la dureté Vickers (Figure III.11) qui a été conçue dans les années 1920 par les ingénieurs de la société Vickers en Angleterre. Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un indenteur sous une charge donnée durant 15 secondes. L'indenteur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136°. La charge appliquée est comprise entre 1 et 120 daN. Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope. La dureté Vickers (HV) est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$HV = \frac{1,854F}{D^2}$$

Où F est la charge appliquée en daN et D , la diagonale de l'empreinte en millimètres. La profondeur de pénétration H est $H = D / 7$.

Cet essai est appliqué principalement aux métaux, mais peut être également appliqué aux céramiques avec de très faibles charges [40].

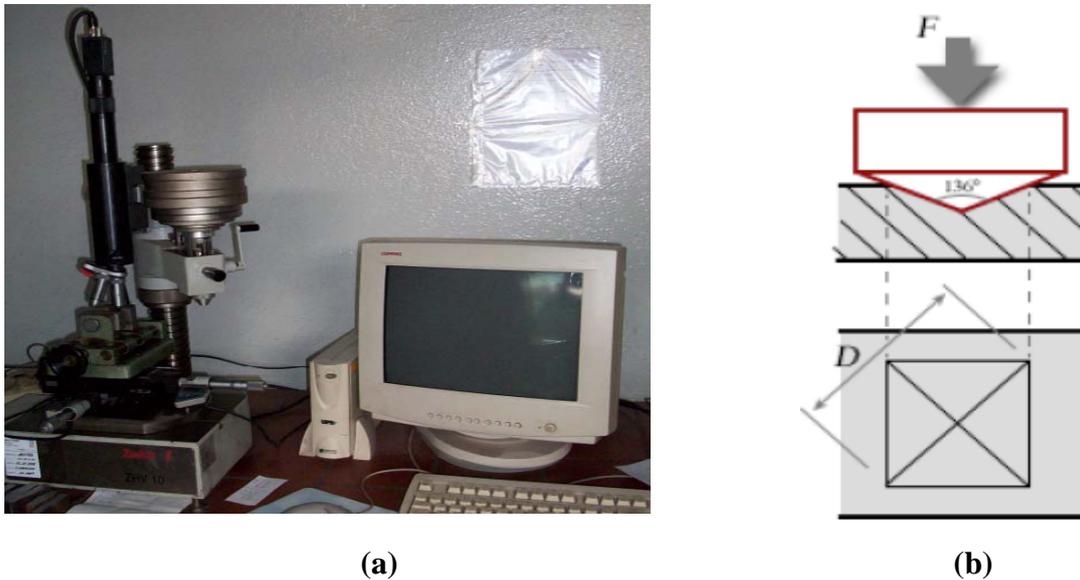


Figure III.11 (a) Machine d'essai de dureté Vickers (ZWIK L ZHV 10), (b) description de l'essai.

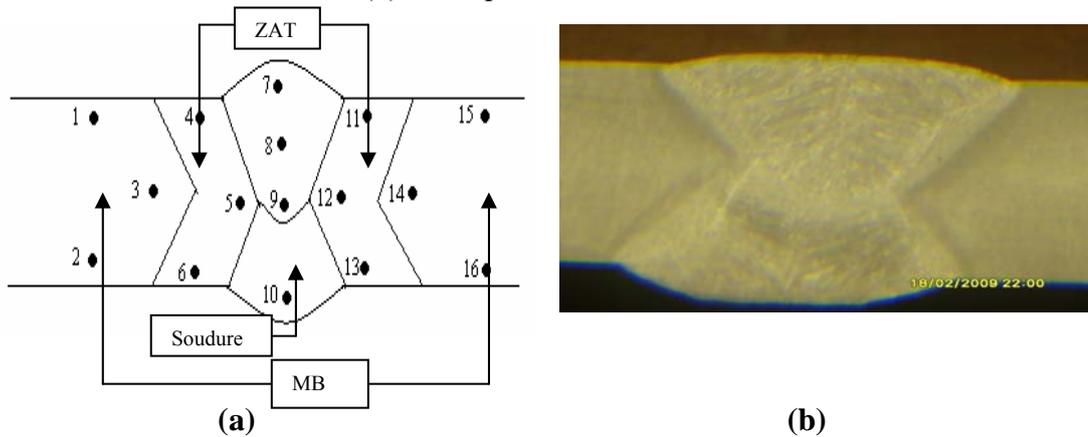


Figure III.12 (a) Les points des essais de dureté, (b) la forme de la soudure.

a) Paramètres d'essai

Test standard: HV 10
 Matériau: X70, tube C553 coulée 161714
 Bobine 7426911
 Type de la machine: ZWIK L ZHV 10
 Méthode d'essai de dureté: Vickers Hardness
 Étape de chargement (HV): HV10
 charge d'essai 98,07 N
 Méthode de profondeur de dureté: eht

L'analyse des résultats obtenus (Figure III.13) montre que le métal de la soudure (MS) est le plus dur que le métal de la zone de transitions (ZAT) et ce dernier est plus dur que le métal de base (MB). Ceci se traduit par le fait que la pénétration D_n dans le métal de base est plus grand que les autres (Tableau III.4). Donc, on peut conclure que la soudure influence la ductilité du matériau par l'effet de l'augmentation de la dureté.

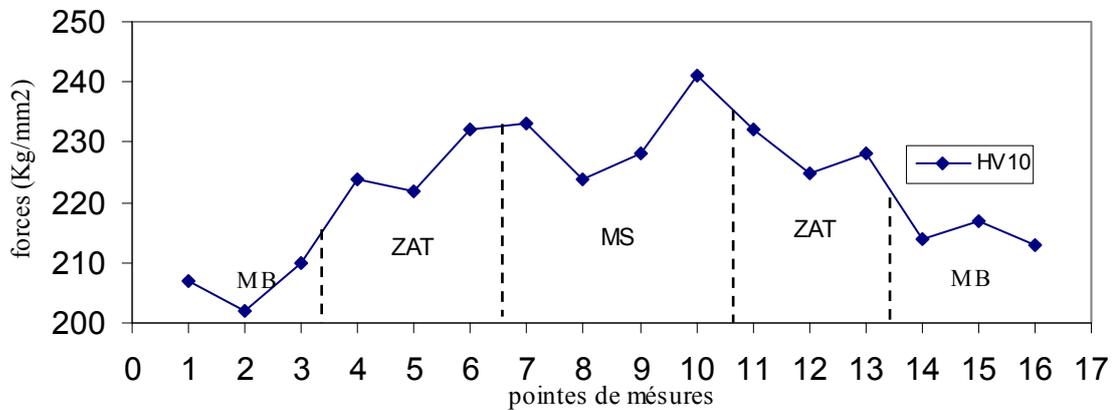


Figure III.13 Duretés mesurées sur les 03 zones (MB, MS, ZAT)

Tableau III.4 Tableau de résultat d'essai de dureté dans les 03 zones (MB, MS, ZAT).

points	D_n (mm)	D_v (mm)	HV10
1	0.30	0.30	207
2	0.31	0.30	202
3	0.30	0.30	210
4	0.29	0.29	224
5	0.29	0.29	222
6	0.28	0.29	232
7	0.28	0.29	233
8	0.29	0.28	224
9	0.28	0.29	228
10	0.28	0.27	241
11	0.28	0.28	232
12	0.29	0.29	225
13	0.29	0.28	228
14	0.30	0.29	214
15	0.30	0.29	217
16	0.30	0.29	213

III.4.2.3. Essai de pliage

L'essai de pliage utilise une éprouvette ayant trois points d'appui et pliée jusqu'à l'obtention d'un angle spécifique et est une méthode pour évaluer la ductilité, mais il ne peut pas être considéré en tant qu'un des moyens quantitatifs de prévoir l'exécution de service des opérations de ployage. La sévérité de l'essai est principalement une fonction de l'angle de la courbure et du diamètre intérieur auquel l'éprouvette est pliée. Le côté extérieur de l'éprouvette de pliage subit une déformation plastique en traction de telle sorte que chaque défaut ou fragilisation du matériau est nettement visible. Cet essai peut être réalisé de façon à ce que l'éprouvette se plie librement ou que le pliage soit guidé par un

mandrin (Figure III.14). L'essai de pliage où l'éprouvette s'enroule autour d'un mandrin de diamètre spécifique est celui exigé lors des essais de qualification des modes opératoires de soudage. On retrouve, par exemple, ces exigences dans l'ASME IX, EN 287, EN 288 et ISO 15614.

* *L'essai de pliage*. Les conditions varient selon l'endroit et l'orientation de l'éprouvette d'essai, la composition chimique, les propriétés de traction, la dureté, le type et la qualité de l'acier spécifique. Les méthodes d'essai E 190 et la méthode E 290 sont utilisées comme méthodes de réalisation des essais.

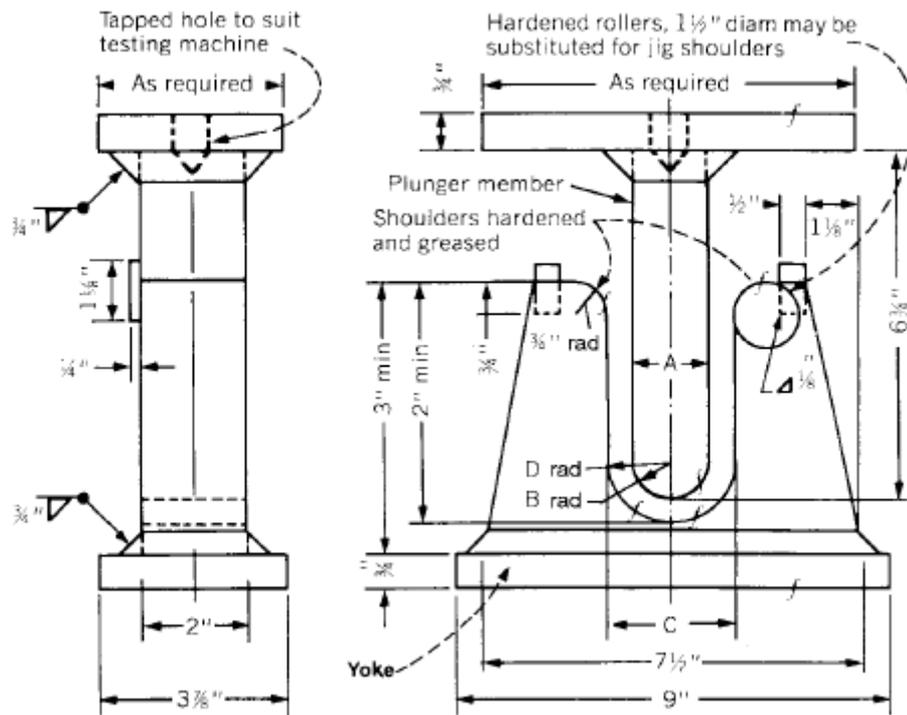


Figure III.14 Guide de l'essai de pliage [38].

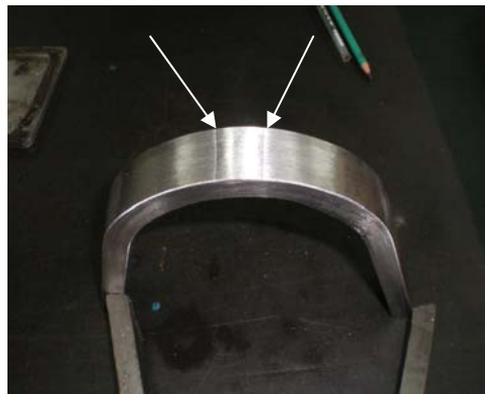
Tableau III.5 Dimensions des paramètres A, B, C et D [38].

L'épaisseur (in)	A	B	C	D	
$\frac{3}{8}$	$1\frac{1}{2}$	$\frac{7}{4}$	$2\frac{7}{8}$	$\frac{17}{16}$	
t	4t	2t	$6t + \frac{1}{8}$	$3t + \frac{1}{16}$	
					Matériau
$\frac{3}{8}$	$2\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{4}$	$3\frac{7}{8}$	$1\frac{11}{16}$	Matériaux avec la spécification Rm
t	$6\frac{1}{2}t$	$3\frac{1}{2}t$	$8\frac{7}{8}t + \frac{1}{8}$	$4\frac{1}{2}t + \frac{1}{16}$	

L'éprouvette de pliage est examinée du côté sollicité en traction. La plupart des spécifications considèrent les défauts ayant une longueur de 3 mm ou plus pour être rebutés. Dans le cas de soudures bout à bout pour les essais de qualification des modes opératoires et des soudeurs, les éprouvettes sont pliées transversalement ou parallèlement dans le sens du soudage. Pour une épaisseur inférieure à 12 mm environ, l'éprouvette est pliée transversalement au sens de la soudage [41]. Lors du pliage la surface en contact avec le poinçon est soumise à la compression alors que la surface libre est soumise à une traction (Figure III.15).



Eprouvette sous chargement



après l'essai

Figure III.15 Essai de pliage.

Dans le but d'évaluation la capacité de déformation plastique d'un matériau donc d'en vérifier la ductilité. Cet essai s'applique à tous les matériaux d'une forme parallélépipédique de surface lisse et sans entaille. Ses résultats sont :

- L'éprouvette ne doit se rompre au pliage.
- Après pliage la surface tendue de l'éprouvette ne doit pas être fissurée.

L'opérateur doit vérifier aussi les assemblages soudés :

- *Résistent à une sollicitation d'arrachement manuelle,
- *Présentent d'une pénétration de soudure correcte (ni collage, ni écrasement),
- *Ne présentent pas de trace de brûlure,
- *Ne présentent pas de fissuration visible à l'oeil nu.
- *Ce pliage ne doit pas faire apparaître de rupture de l'armature.

III.4.2.4. Essai au choc (Charpy)

Un essai au choc d'entaille en V de Charpy est un essai dynamique dans lequel un spécimen entaillé est heurté et enfoncé par un coup simple dans une machine d'essai particulièrement conçue. Les valeurs mesurées d'essai peuvent être l'énergie absorbée, la rupture de cisaillement, l'expansion latérale vis-à-vis de l'entaille, ou une combinaison.

Les températures d'essai autres que la température ambiante de pièce souvent est spécifiée dans le produit ou les caractéristiques de condition générale. Bien que la

température d'essai soit parfois liée à la température prévue de service, les deux températures n'ont pas besoin d'être identiques [43]. Mais dans notre cas la température des essais est de -10°C . Pour obtenir cette température on utilise des fluides effrayants (tels que l'eau, la glace plus l'eau, la glace sèche plus les dissolvants organiques, ou l'azote liquide). Dans notre cas c'est l'azote liquide qui est utilisé.

a). *Distribution des contraintes en fond d'entaille dans une éprouvette CHARPY*

La confection de l'entaille qui a une influence considérable sur les résultats de l'essai : nous proposons d'adopter une entaille à fond cylindrique préparée avec un outil travaillant perpendiculairement dans le sens de l'entaille de façon à éviter toute strie qui pourrait jouer le rôle d'entaille aiguë [43].

Les essais de résilience ont été réalisés sur des éprouvettes normalisées CVN 10×10 dont la géométrie selon [API] est donnée à la (Figure III.17.d) et à une température de -10° assuré par un appareil de chauffage et refroidissement à la fois (Figure III.16.a) et sur un Pendule Mouton Charpy (Figure III.16.b). Les éprouvettes ont été prélevées dans les trois zones la MB, MS, ZAT sous l'angle de 45° par rapport à l'axe de laminage. Les résultats des essais, sont reportés dans le tableau III.6.

b). *Mesure d'une énergie de « rupture »*



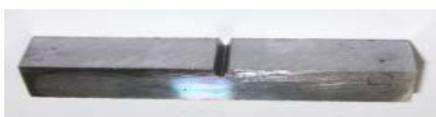
(a) Appareil de refroidissement



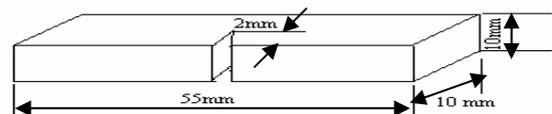
(b) La machine d'essai de charpy ROOL Amsler RKP

300

Figure III.16. Appareillages d'essai



(c) Eprouvette d'essai



(d) Dimension de l'éprouvette

Figure III.17 Eprouvette d'essai de Charpy et leur dimension.



L'entaille à la soudure (MS)
(ZAT)

Métal de base (MB)

la ligne de fusion

Figure III.18. Type de rupture après les essais de CHARPY.

Tableau III.6 Tableau de résultat d'essai de CHARPY.

Zone d'entaille	Matériau de base		Milieu de la soudure		Ligne de fusion	
	Travail (J)	moyen	Travail (J)	moyen	Travail (J)	moyen
1	232	235	150	142	234	225
2	234		116		230	
3	240		162		210	

L'analyse des résultats obtenus (Tableau III.6) montre que les énergies décroissantes du métal de base passant par la ligne de fusion jusqu'au cordon de soudure. En conclusion, la fragilité dépend du type du matériau de la zone de l'entaille de l'éprouvette.

III.5. Les examens de structure

III.5.1. Macrographie

La technique de macrographie (Figure III.19 et III.20) a pour but de connaître la structure dans toute l'étendue d'une pièce, donc c'est un examen d'ensemble effectué à l'oeil nu où avec une loupe, après préparation de la surface où d'une coupe de la pièce. On met ainsi en évidence les hétérogénéités de structure ou de composition (grosseur et orientation des grains ...). Cet examen se fait à une échelle d'ordre de 1 mm.



Figure III.19. Appareil pour les films macrographiques

Nom : Leitz-wetzlar.
 Type : 301-182-101 n° 295.
 Appareil photomarcrogrphique

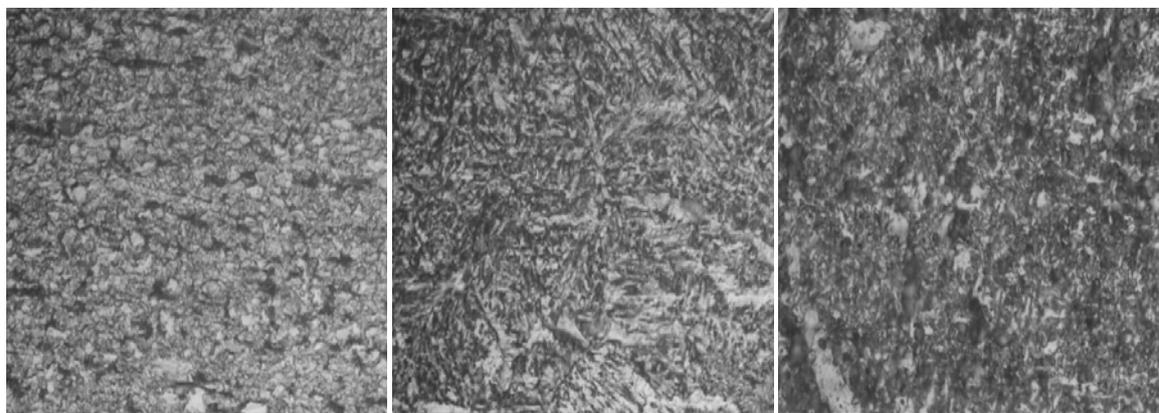


Figure III.20. Défauts de désaxage de la soudure sur un tube en acier X70.

Illustration d'un exemple de défaut de soudage.

III.5.2. Micrographie

Les propriétés d'un matériau ne dépendent pas seulement de la composition chimique mais aussi de la microstructure, c'est-à-dire de la taille et de la répartition des grains ou des phases qui constituent le matériau. Cet examen se fait à une échelle d'ordre de 1 μm . L'observation métallographique sur microscope optique sur les différentes zones (Figure III.21).



(a) structure de la zone MB (b) structure de la zone ZAT (c) structure de la Zone MS.

Figure III.21. Microstructure des différentes zones : MB, ZAT, MS.

III.6. Compositions chimique du matériaux de pipe X70

III.6.1. SPECTROLAB

SPECTROLAB, SPECTRO introduit une nouvelle catégorie de spectromètres pour l'analyse des métaux (Figure III.22). Elle se distingue par des performances analytiques améliorées, plus de flexibilité et de simplicité d'utilisation. En fonction des demandes

individuelles, le besoin analytique permet d'ajusté sur la base de dix matrices standards, Fe, Al, Cu, Ni, Co, Mg, Ti, Sn, Pb et Zn, ou, comme alternative, sur la base de cinq matrices de métaux précieux, Au, Ag, Pt, Pd et Ru.



Figure III.22. SPECTRO LAB de mesure des teneurs des éléments chimiques du métal.

Le système optique unique du SPECTROLAB utilise les avantages spécifiques des systèmes de détection précédents : photomultiplicateurs et CCDs. Il comporte deux modules spectraux distincts dans laquelle les signaux sont traités simultanément par un tout nouveau système d'acquisition de très hautes performances. Ainsi configuré et avec d'autres composants modernes et de qualité, le SPECTROLAB est conçu pour des besoins analytiques élevés dans les industries de production, d'élaboration et de recyclage des métaux.

Le SPECTROLAB est un spectromètre étincelle, haute sensibilité et précision, qui permet de réaliser des analyses d'alliages dans les domaines de la production et transformation des métaux, de la fonderie et des industries du recyclage.



avant l'essai

après essai

Figure III.23. Échantillon d'essai.

Tableau III.7 Teneurs des compositions chimiques du matériau de base.

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu
Value	0,085	0,321	1,52	0,02	0,006	0,033	0,018	0,003	0,038	0,003	0,013
Eléments	Nb	Ti	V	W	Sn	B	Fe	V+Nb	S+D	Ceq	
value	0,053	0,007	0,063	0,003	0,604	0,001	97,8	-	0,0073	0,36	

III.7. Contrôles des tubes

III.7.1. Contrôles visuels

Ces contrôles concernent le métal de base et le cordon de soudure. Ils ont pour but de mettre en évidence les défauts soit directement (visuel) soit indirectement par leurs effets (visuel, magnétoscopie, ultrasons, radiographie ...). Ces défauts sont de types :

- Défauts admissibles (soufflures sphériques ou allongées, coup d'arc,...).
- Défauts non admissibles (manque de pénétration, fissures, caniveaux,...).

La conformité des tubes est vérifiée à la fin de l'opération de fabrication et avant leur acheminement vers le parc par différents moyens de contrôle. Les étapes de contrôle sont les suivants (Tableau III.8) :

Tableau III. 8 Paramètres de contrôle visuel.

Paramètre	Unité	Méthode de mesure
Diamètre	mm	Micromètre (ruban gradué)
Epaisseur de la paroi	mm	DM2 (micromètre)
Longueur	mm	Double décimètre
Rectitude	mm	Fil à plomb et règle
Equerrage des extrémités de tube	mm	Equerre
Ovalisation en corps et en extrémité de tube	mm	Piges micrométriques
Effet de toit	mm	Comparateur
Dénivellation (décalage radial)	mm	Comparateur
Hauteur du cordon de soudure	mm	Calibre d'élévation
Largueur du cordon de soudure	mm	Règle
Angle de chanfrein	mm	Compas de chanfrein réglable
Talon de chanfrein	mm	Règle
Enfoncement	mm	Règle
Masse de tube	kg	balance

III.7.2. Contrôle par radiographie

Le contrôle radiographique des soudures est effectué dans deux chambres à rayons X et le cordon de soudure est visualisé en totalité par radioscopie. Toute fois le repérage de défauts est sanctionné par une prise de clichés. Un marquage indélébile repère l'endroit du défaut. Le contrôle des réparations et des indications de l'ultrason ainsi que les extrémités des tubes sont réalisées au niveau de la chambre de radiographie.

III.7.3. Contrôle par magnétoscopie

La magnétoscopie permet de déceler les défauts débouchant à la surface du cordon de soudure, voire même légèrement sous jacents. Elle est utilisée particulièrement pour la réparation du cordon de soudure. Chaque goujure est suivi d'un meulage. Un contrôle magnétoscopique par contraste est effectué pour s'assurer de l'élimination totale du défaut signalé par la chambre noire. La zone à réparer est contrôlée par radiographie.

III.7.4. Epreuve hydrostatique

Chaque tube subit l'épreuve hydrostatique au niveau de l'installation relative à ce test (banc d'épreuve hydrostatique) avant tout test final (Figure III.24). Les tubes sont testés à 90% de leur limite élastique selon API 5L et la spécification du client.

Chaque tube doit être maintenu à la pression d'essai pendant au moins 15 secondes. Les étapes de l'épreuve sont enregistrées automatiquement à l'aide des courbes.



Figure III.24. Banc d'épreuve hydrostatique.

III.7.5. Contrôle aux ultrasons automatiques (après test hydrostatique)

Le contrôle aux ultrasons est réalisé sur le cordon de soudure, le métal de base et les extrémités du tube afin de détecter tout défaut (Figure III.25). Les résultats du contrôle sont enregistrés automatiquement sur PC et imprimés sur papier (rapport Ultrason ou le numéro de tube y est reporté ; les indications des défauts sont affichées d'une manière acoustique et optique). Pour contrôler la fiabilité de l'installation ultrasonique, un tube étalon est passé périodiquement en début et fin contrôle de chaque poste de travail, l'inspecteur s'assurera que tous les défauts artificiels créés sur ce tube sont repérés lors du contrôle.



Figure III.25. Contrôle des tubes aux ultrasons.

III.7.6. Contrôle final

C'est un contrôle visuel dimensionnel qui consiste en un contrôle interne et externe de chaque tube en contrôlant les renseignements mentionnés sur la carte tube. Le tube est alors réceptionné ou déclassé, un numéro séquentiel lui sera attribué. Le contrôleur final veille au marquage des tubes selon la procédure en cours.

III.8. Revêtement

III.8.1. Revêtement intérieur

Le revêtement intérieur en résine époxyde s'applique sur les tubes destinés au:

- Transport et à la distribution du gaz sec.
- Transport du gaz humide, d'eau potable brute et industrielle.

L'aspect du revêtement est brillant, lisse et répond aux exigences de la norme API RP 51 et au standard AWWC210.

III.8.2. Revêtement extérieur

En polyéthylène en tri couches

Domaine d'application :

- Canalisation enterrée ou posée en surface
- Canalisation émergée en eau douce ou salée

Le revêtement est constitué de :

- Une couche de résine époxyde appliquée par pulvérisation électrostatique de 50-80 microns d'épaisseur.
- Une deuxième couche en copolymère destiné à assurer l'adhérence polyéthylène.
- Une troisième couche de polyéthylène extrudé.

Les avantages du revêtement extérieur en polyéthylène se caractérisent par une grande inertie chimique, une excellente adhérence de revêtement sur le corps de l'acier. Un apport au réseau d'une résistance fiable vis à vis des sols agressifs et des courants vagabonds.

Les étapes du revêtement :

1^{er} étape : échauffement du pipe jusqu'à 170°C, 180°C

2^{ème} étape : bouchement du pipe par des joints en mousse

3^{ème} étape : le pipe est entraîné dans une machine de grenailage appelé grenailleuse. Puis, la machine bombarde la surface externe par des grains solides pour l'arrachement de la couche corrodée.

4^{ème} étape : réchauffé le pipe jusqu'à la température de 170°C

5^{ème} étape : le pipe est rentré dans une machine pour une 1^{er} couche de revêtement externe par une résine d'époxyde qui est anti corrosion. Puis, par une bobine support une résine d'adhésive, en même temps, il existe autre bobine ou rouleau de polyéthylène pour former une "sleeve" douille sur les deux premières couches, cette sleeve là est utilisée pour résister aux effets externes de l'environnement.

6^{ème} étape : refroidissement de l'ensemble pipe revêtement pour la solidification des douilles

7^{ème} étape : incliné le pipe puis injecté de l'air chaud pour qu'il sèche

8^{ème} étape : brosser les bornes du pipe pour créer une zone de soudure entre deux pipes

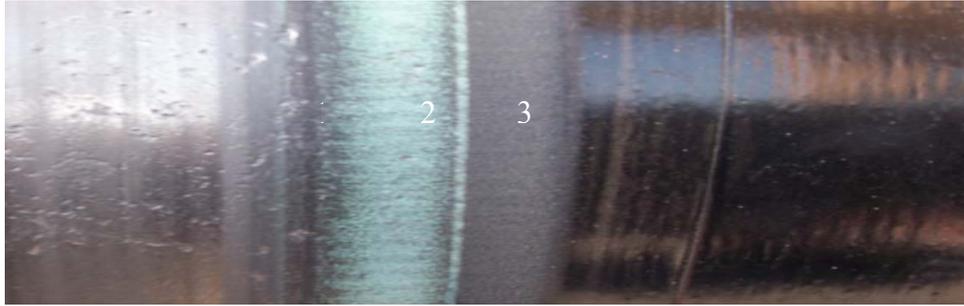


Figure III.26. Les couches de revêtement.

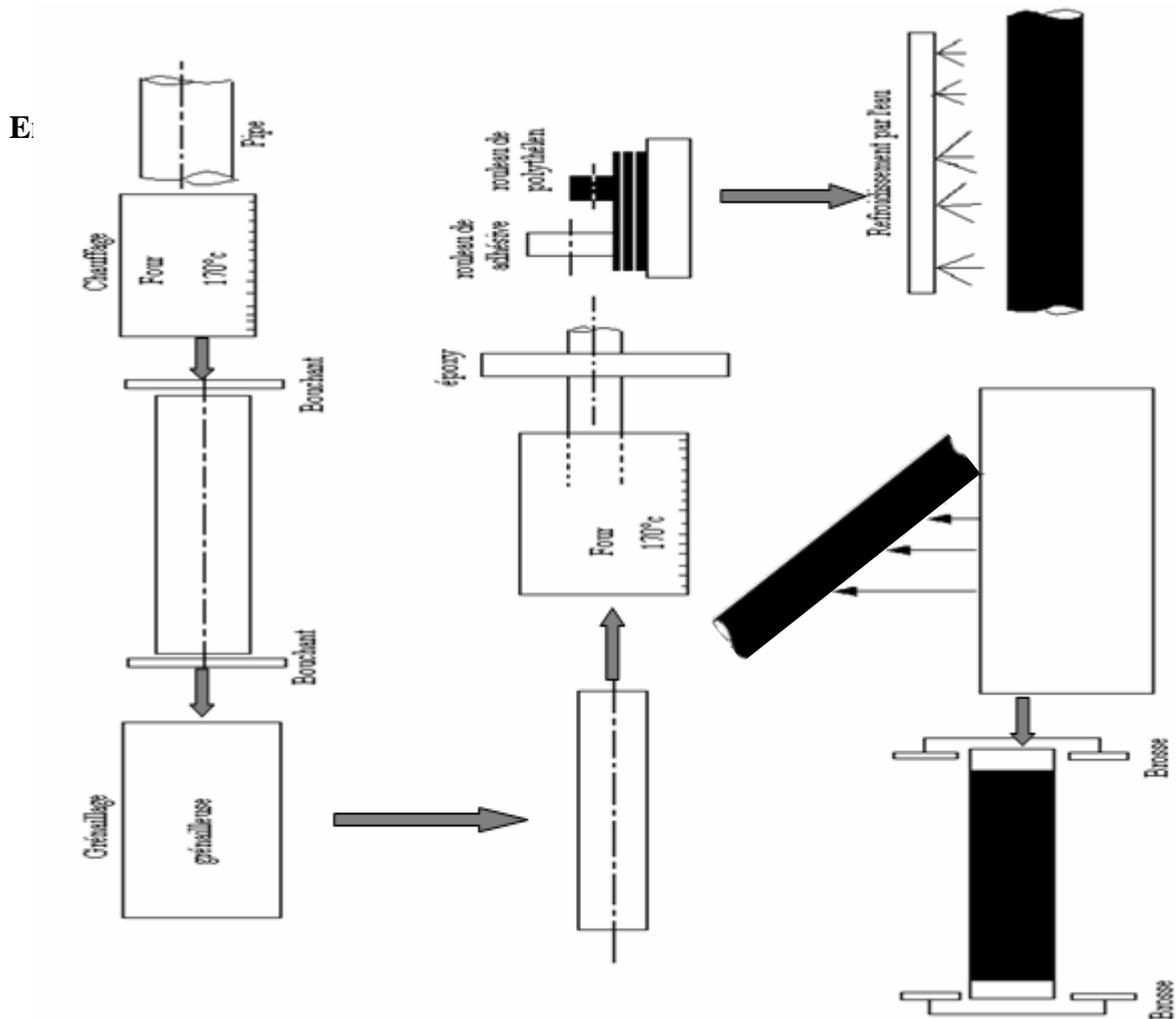


Figure III.27. Les étapes de revêtement.

III.8.3. Objectif du revêtement

L'augmentation de la durée de vie du pipe est demandé une protection par des revêtements qui est constitué principalement par des résines et des métaux de polyéthylènes qui adhère au parois externe du tube pour éviter les effets des conditions obligatoires d'environnement (corrosions, érosion), et les action mécanique qui peut être défauts pendant l'installation ou pendant le service.

III.9. Conclusion

Au cours de ce chapitre le matériau du tube est étudié expérimentalement en : traction, pliage, au choc (Charpy), dureté, et essai de contrôle à savoir le gonflement, contrôle de la soudure et enfin le revêtement interne et externe du pipeline.

La fonctionnalité dans les conditions de fabrication des tubes ou dans les conditions de service exige des informations et des résultats d'essais mécaniques qui peuvent être résumés comme suit :

- la soudure joue un rôle de renforcement de matériau de base.
- la rupture en traction doit s'effectuer dans le métal de base et non pas dans la zone de soudure
- le métal de la soudure (MS) est le plus dur que le métal de la zone de transitions (ZAT) et ce dernier est plus dur que le métal de base (MB).
- la pénétration Dn dans le métal de base est plus grande que dans le métal de la zone de transition et dans le métal de la soudure.
- la soudure influence la ductilité du matériau par l'effet de l'augmentation de la dureté.
- l'éprouvette ne doit pas se rompre au pliage et la surface tendue de l'éprouvette ne doit pas être fissurée.

Chapitre 04

Modélisation par simulation numérique de tube sans défaut et avec endommagements localisés.

Modélisation par simulation numérique de tube sans défaut et avec endommagements localisés.

IV.1 Introduction

Si l'expérimentation en vraie grandeur demeure la référence objective de toute information, son coût élevé à tous points de vue la rend difficilement utilisable, notamment lorsque plusieurs paramètres doivent être analysés. Les quelques résultats d'expérimentation en vraie grandeur précédemment rapportés ont permis de mettre en évidence les principaux phénomènes caractéristiques du comportement mécanique d'un tube pour transport d'hydrocarbure, dans le cas de sollicitations généralisées essentielles. Ils ne sauraient toutefois constituer, compte tenu de leur nombre très limité, une base de données expérimentale suffisante à une généralisation pour les intervalles de variation des paramètres géométriques rencontrés dans les situations d'usage.

On a construit un ensemble de simulations numériques de configurations type, en vue de leur calcul par éléments finis. Le code de calcul utilisé est le code ANSYS Multi Physics V11, qui est bien connu et largement utilisé dans des contextes industriels et/ou de recherche.

Nos "expérimentations" numériques ont été effectuées en deux étapes principales et chaque étape est divisée en deux sous étapes successives:

La 1^{ère} étape est une simulation en deux dimensions pour voir les sollicitations de l'épaisseur du tube sans endommagement et avec endommagement, qui nous permet de choisir la fissure comme de défaillance localisées. D'autres simulations sont utilisées dans le but de réparer ces défaillances par matériau composite CFRP (Carbon Fibre reinforced Plastic).

La 2^{ème} étape suit la même méthodologie que la 1^{ère} mais en trois dimensions pour accéder la solution dans le volume et dans la longueur du tube. L'étude en 3D est étendue à une défaillance localisé par corrosion et réparé par une enveloppe composite CFRP ainsi qu'à la réparation de fissure localisée par soudure et par matériau composite.

IV.2. Hypothèse générale de la modélisation

La simulation numérique constitue une première étape de validation aussi proche que possible des données et des conditions d'expérimentation. Dans le contexte de notre travail, l'échantillon de structure est essentiellement composé d'une éprouvette cylindrique (coque à simple courbure) sans défaut et avec des défauts de corrosion et de fissure. Le matériau du tube est l'acier X70 et celui de la réparation est CFRP avec une matrice époxyde comme un adhésif, relevant de modèles de comportement élasto-plastique. La

simulation associe une représentation géométrique, un modèle mécanique, un modèle de comportement des matériaux et une représentation des actions extérieures (conditions aux limites). On résumera ci-après les hypothèses retenues pour chacune de ces représentations.

IV.2.1. Représentation géométrique

Un modèle formellement identique au tube considéré est décrit dans les essais effectivement effectués. La représentation des tronçons de tubes admet une section circulaire et une rectitude parfaite. Le diamètre moyen et l'épaisseur ont été considérés ici comme des valeurs nominales.

IV.2.2. Les éléments de maillages

Pour une étude 2D

a) Description de l'élément PLANE 183

PLANE 183 est un élément plane évolué 2-D à 6 noeuds ou 8 noeuds qui a le comportement quadratique du déplacement et est bien adapté à modéliser les mailles irrégulières (comme ceux produits par de divers systèmes de CFAO). Cet élément a deux degrés de libertés à chaque noeud : translations dans les directions nodales suivant X et Y. L'élément peut être employé comme élément plan (contrainte plane, déformation plane et contrainte plate généralisée) ou comme élément axisymétrique (c'est notre cas). Cet élément a la plasticité, l'hyperélasticité, le fluage, l'effort raidissant, le grand débattement, et les grandes possibilités de contrainte. Il permet également de mixer des possibilités de formulation pour simuler des déformations des matériaux élasto-plastiques presque incompressibles, et des matériaux hyper élastique entièrement incompressibles. L'importation initiale d'effort est soutenue. Les diverses options de liste imprimée sont également disponibles. Voir le PLANE 183 dans la référence de la théorie d'ANSYS [44] pour plus de détails au sujet de cet élément.

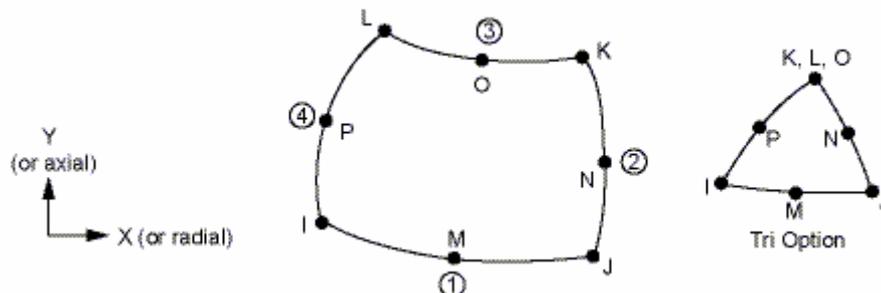


Figure IV.1. Géométrie d'élément de maillage PLANE183.

Pour un étude 3D

b) Description de l'élément SOLID 185

SOLID185 est utilisé pour la modélisation en trois dimensions des structures pleines. Il est défini par huit noeuds ayant trois degrés de libertés à chaque noeud : translations dans les directions nodales suivant X, Y, et Z. L'élément a la plasticité, l'hyperélasticité, contraintes raidissant, le fluage, la grande déviation, et les grandes possibilités de contrainte. Il permet également de mixer les possibilités de formulation pour

simuler des déformations des matériaux élastoplastiques, et hyperélastique entièrement incompressibles. Le solide SOLID 185 tient compte du prisme et des dégénération tétraédriques une fois utilisé dans des régions irrégulières. De diverses technologies d'élément telles que la B-barre, l'intégration uniformément réduite, et les contraintes augmentées sont soutenues.

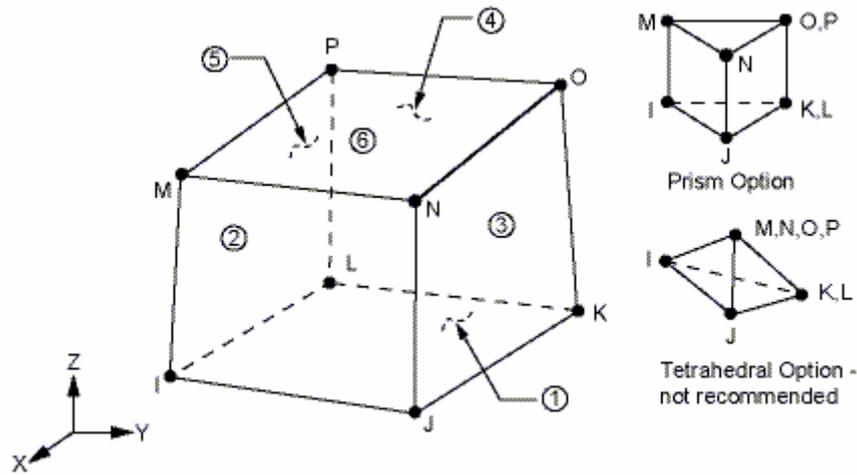


Figure IV.2. Géométrie de l'élément SOLID185.

L'élément de maillage du matériau de réparation CFRP

c) Description de l'élément SOLID46

SOLID46 est une version modifiée à la base du solide structural de 8 noeuds (SOLID45) conçu pour modéliser les coques ou les solides épais. L'élément permet de modéliser jusqu'à 250 couches de matériau différent. Dans le cas de nécessité de plus de 250 couches sont exigées, une option constitutive de matrice disponible peut être entrer par l'utilisateur. L'élément peut être également empilé comme approche alternative. L'élément a trois degrés de liberté à chaque noeud dans les directions nodales suivant les axes x, y, et z.

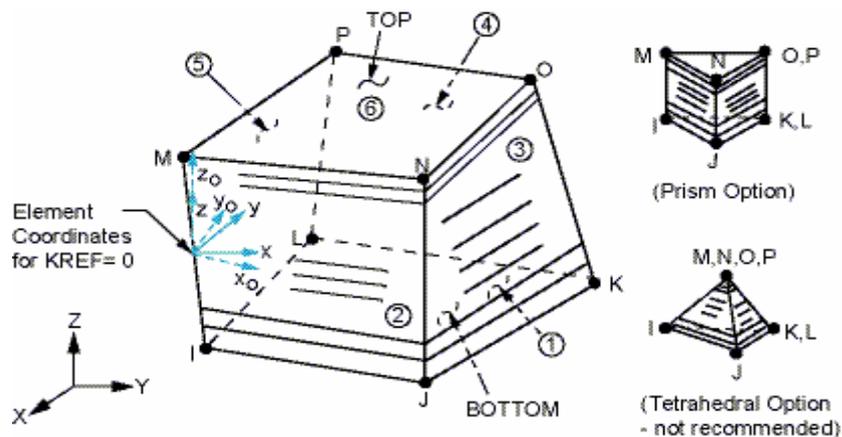


Figure IV.3 Élément de maillage SOLID46

****Données d'entrée pour SOLID46***

La géométrie, localisation des noeuds, et les coordonnées du système pour cet élément sont montrées sur la figure IV.3. L'élément est défini par huit noeuds, épaisseurs des couches, angle de direction des couches et leur matériaux, et propriétés orthotropes des

matériaux. Les modules de cisaillement G_{xz} et G_{yz} doivent être dans un facteur de 10 000 fois l'un par rapport à l'autre.

L'axe Z de l'élément Solid46 est défini comme normal à un plan de référence plat, utiliser la vraie constante KREF suivant les indications de la figure IV.3 «produit des contraintes de SOLID46». KREF peut avoir des valeurs de 0 dans le cas d'un plan milieu (midplane), de 1 dans le cas du bat ou d'un fond (bottom), ou de 2 est dessus (top). Si les noeuds se trouve dans une surface déformée, utilisée un plan moyen. Le défaut de l'élément suivant l'axe des X est la projection de côté I-J, M-N côté, ou à leur moyenne (selon KREF) dans le plan de référence. L'orientation dans le plan des couches peut être changée par l'utilisation de la commande ESYS de la même manière qu'il est employé pour des éléments type coque comme décrit dans les systèmes de coordonner. Pour réorienter les éléments (après le maillage automatique) la commande EORIENT devra être employer. Avec la commande EORIENT, il est possible de faire des éléments de SOLID46 ayant l'orientation désirée, ou placer l'orientation pour être aussi parallèle que possible à un axe défini [44].

IV.3. Matériaux et propriétés

Le diamètre extérieur du tube est 48 inches (1219,2 mm) l'épaisseur est 0.563 inches (14,3 mm).

Tableau 01. Propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans les études.

Matériaux	Propriétés des Matériaux	
	Linéaire	Non linéaire
Acier X70	Module d'Young E 255,4 GPa Coefficient de Poisson, ν 0,29	Contrainte à la limite élastique, σ_y 509,55 MPa. Au dessus de cette valeur c'est le comportement non linéaire qui est considéré dans les simulations élasto-plastique. Voir essais de traction expérimentaux (montrés dans Fig. III.9 chapitre 03).
Résine (Epoxy)	Module d'Young, E 1.74 GPa (252 Ksi) Coefficient de Poisson, ν 0,45 [4]	Contrainte à la limite élastique, σ_y 33 MPa (4,80 Ksi) Module Tangentiel, E_{tan} 0.87 GPa (126 Ksi) [4]
Composite (tissé de carbone de renforcement d'Epoxy)	Modules d'Young, E_x 5,5 GPa (0,80 Msi) E_y 23,4 GPa (3,40 Msi) E_z 49 GPa (7,10 Msi) Coéfficient de Poission ν_{xy} 0,430, ν_{xz} 0,196 ν_{yz} 0,430 Modules de cisaillement G_{xy} 0,69 GPa (0,10 Msi) G_{xz} 29,6 GPa (4,00 Msi) G_{yz} 0,69 GPa (0,10 Msi) [4]	

IV.4. Simulation en 2D d'essai de gonflement de pipe sans endommagement

IV.4.1. Condition aux limites

Pour une solution rapide et fiable un quart de tube en 2D est choisi dans les deux côtés sont symétriquement bloqué l'un sur l'axe X et l'autre sur l'axe Y auquel une pression interne de 102 Bar (est la pression d'essai de laboratoire de ALFAPIPE) est appliqué pour une durée 15 secondes (Figure IV.4).

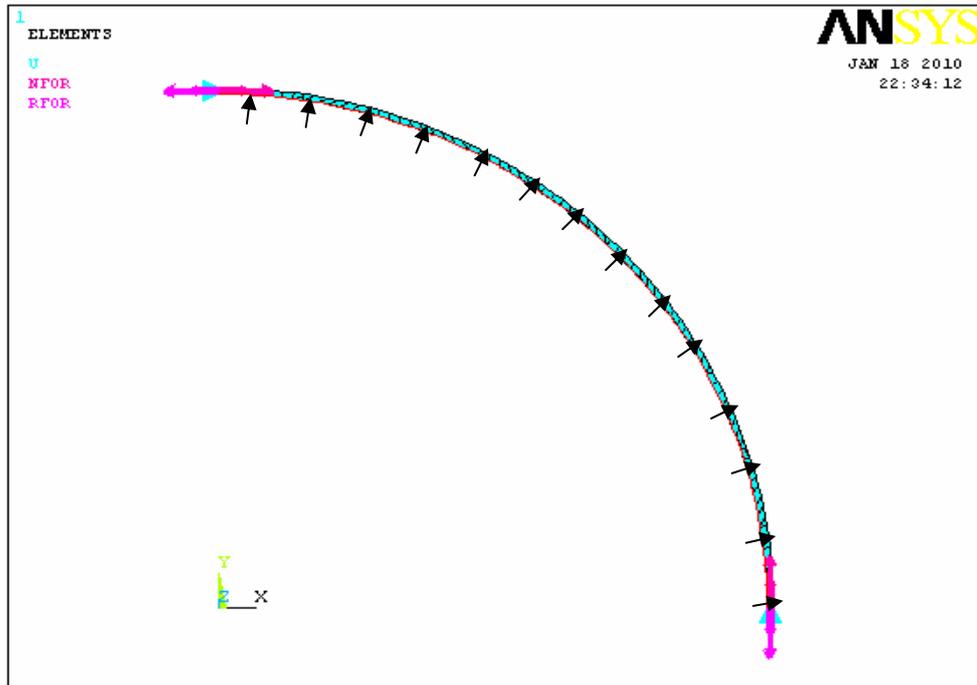


Figure IV.4. Conditions aux limites d'un quart de tube.

IV.4.2. Résultats et discussions

La figure IV.5 représente une simulation dans le plan (2D) de 1/4 de tube avant et après gonflement. Après l'application de la pression de 102 bars pendant 15 secondes le tube gonfle d'une manière uniforme sur l'axe r dont tous les nœuds qui sont sur le rayon externe et interne subissent respectivement les déplacements de 53,83 mm et de 54,48 mm. Pendant la simulation il est considéré que le matériau est parfait et qu'il n'y a pas de défaut.

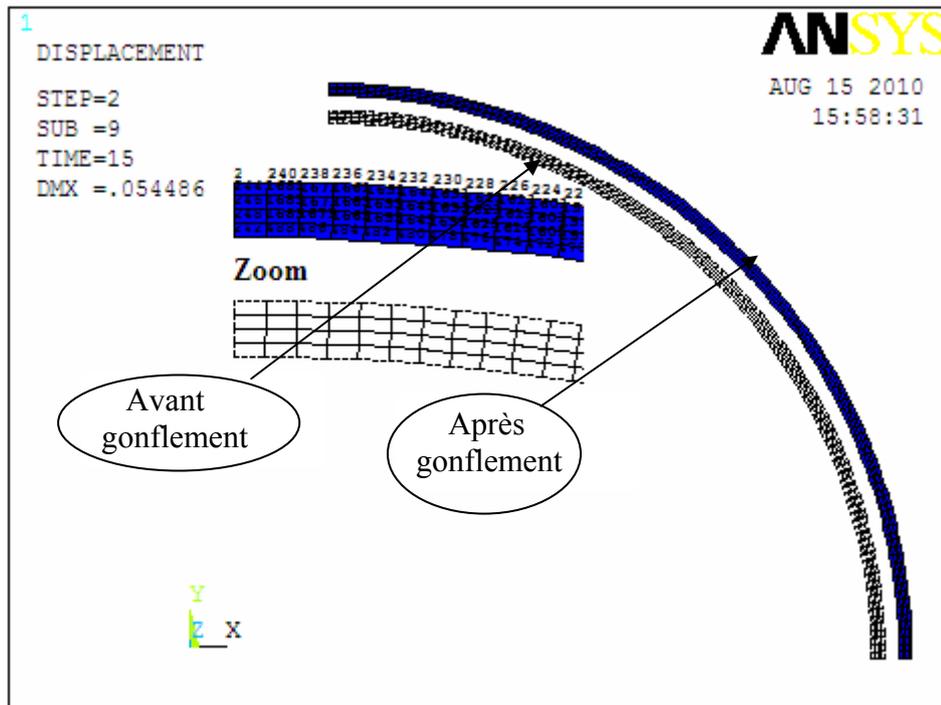


Figure IV.5. Etat de pipe avant et après le gonflement.

La distribution des contraintes de Von mises et circonférentielle à travers l'épaisseur du tube sont présentée dans les figures IV.6 et IV.7 respectivement. Due à la réaction de la pression de chargement dans le tube, la contrainte de Von mises est légèrement plus importante a l'intérieur du tube et décroît a travers l'épaisseur en allons vers l'extrémité (Figures IV.6). Alors que la contrainte circonférentielle maximale est enregistrée à l'extrémité du tube est décroît progressivement de l'extérieur vers l'intérieur du tube (Figures IV.7).

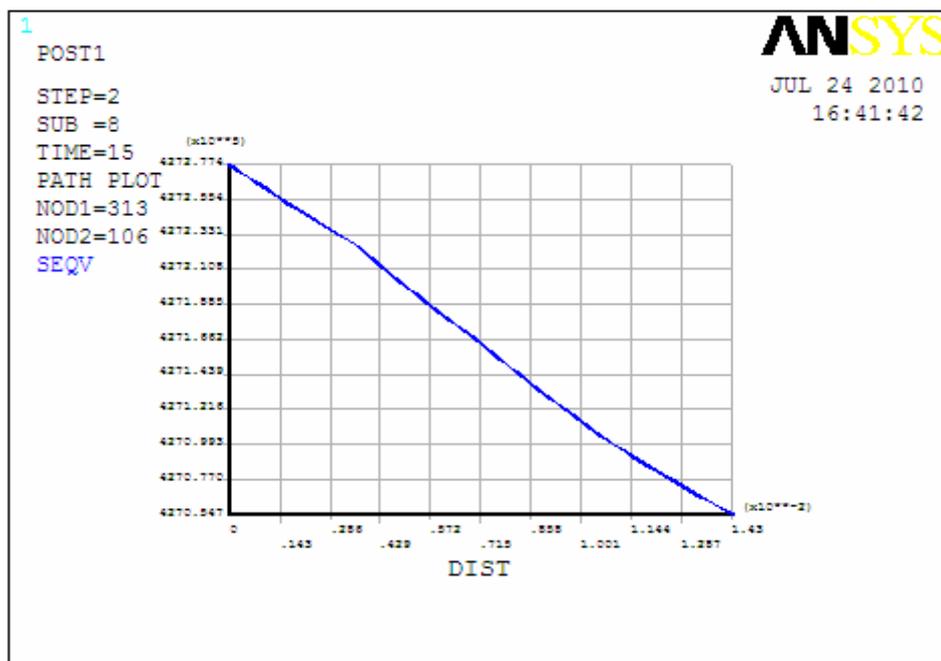


Figure IV.6. Variation de la contrainte de Von mises à travers l'épaisseur du tube.

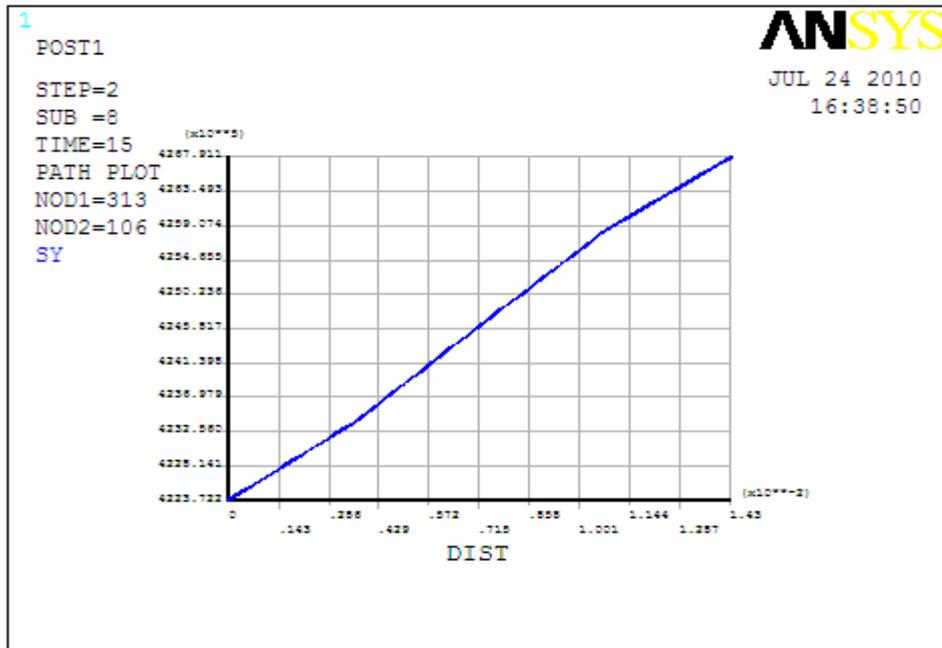


Figure IV.7. Variation de la contrainte circonférentielle a travers la paroi du tube.

La répartition des contraintes circonférentielle (σ_{θ}) a travers l'épaisseur du tube présenté dans la figure IV.8 montre bien que σ_{θ} est maximale a la surface externe et diminue en allant vers la parois interne du tube. En d'autres termes, il n'y a pas une grande différence entre la contrainte maximale et minimale située respectivement à la surface externe et interne du tube.

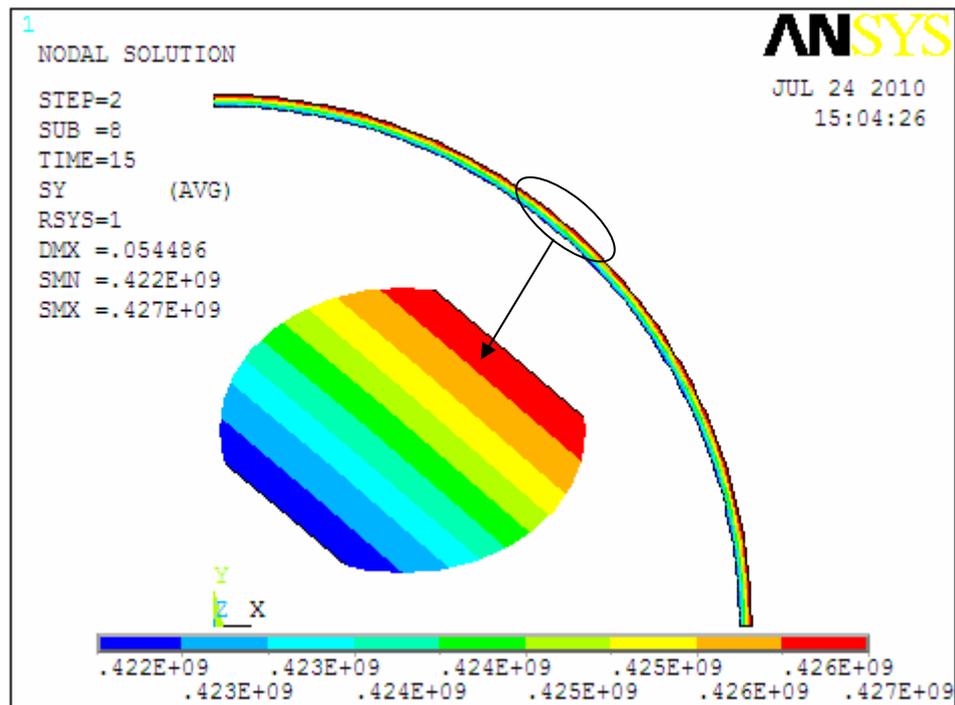


Figure IV.8. Distribution des champs de contraintes circonférentielle σ_{θ} a travers la paroi du tube.

Les figures IV.9 et IV.10 représentent le comportement contrainte/déformation (σ/ε) des noeuds 122 et 370 situés respectivement au milieu externe et interne du 1/4 du tube axisymétrique simulé (c'est-à-dire respectivement $r = r_e$ et $\theta = 45$ degré et $r = r_i$ et $\theta = 45$ degré). Le comportement contrainte/déformation est bilinéaire et identique suivant l'axe X et l'axe Y et les déformations sont positive (cas de traction), alors que suivant le plan XY ces déformation sont beaucoup plus importante mais de signé négatif (cas de compression). De plus, les contraintes maximales suivant l'axe X, Y et dans le plan XY sont égaux pour les noeuds 122 et 370. Il est important de signaler aussi que les contrainte et déformation au niveau du noeud 1 situé sur l'axe X a la paroi externe du tube ($r = r_e$ et $\theta = 0$ degré) sont égaux a ceux du noeud 2 situé sur l'axe Y a la paroi externe du tube ($r = r_e$ et $\theta = 90$ degré).

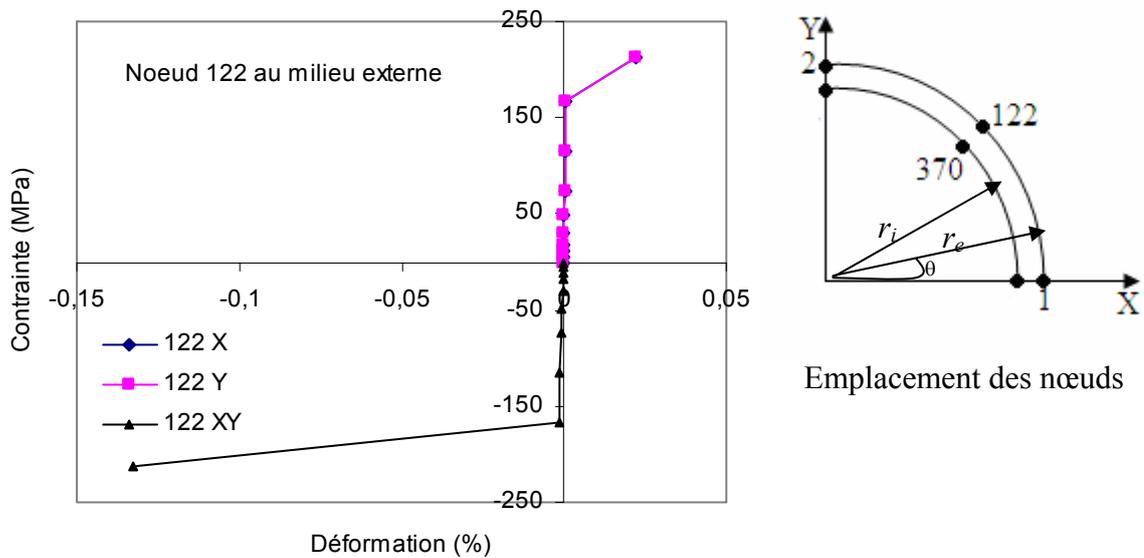


Figure IV.9. Contrainte/déformation du noeud 122 situé au milieu externe du 1/4 du tube axisymétrique simulé.

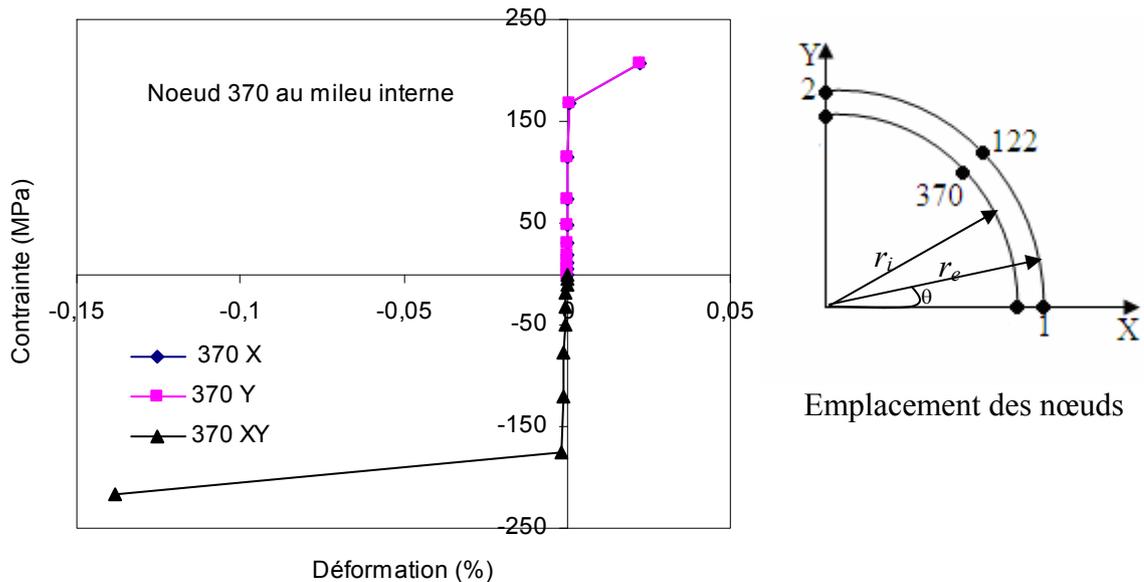


Figure IV.10. Contrainte/déformation du noeud 370 situé au milieu interne du 1/4 du tube axisymétrique simulé.

Le comportement de la contrainte de cisaillement (en Pa) dans le plan $r\theta$ à travers l'épaisseur du tube est présenté dans la figure IV.11. L'analyse des résultats montre la présence de contraintes de traction (positive) dans la section verticale alors que des contraintes de compression (négative) de même valeur sont enregistrées dans la section horizontale.

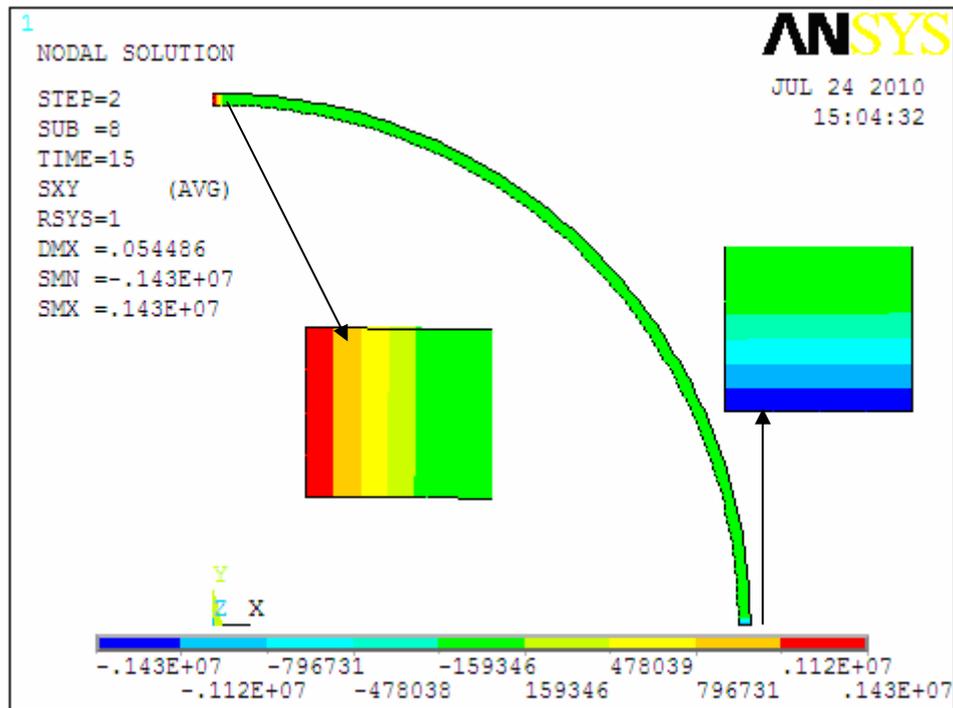


Figure IV.11. Contrainte de cisaillement dans le plan $r\theta$.

IV.5. Simulation d'essai de gonflement de pipe avec endommagement localisé et leur réparation

IV.5.1. Pipe avec défaut (fissure externe)

Considérant qu'une inspection de l'utilisation d'un segment de canalisation par un appareil ultrasonique a détecté une fissure interne de 3,5 mm de profondeur figure IV.12. Le pipe est soumise à une pression interne $P_i = 10,2$ MPa a un rayon interne $r_i = 602,6$ mm, une épaisseur de paroi $e = 14,3$ mm, et les propriétés du matériau d'après les essais mécanique présenté dans le chapitre 03, tableau 01.

Dans cette partie, notre recherche est spécialement focalisé au font de la fissure c'est pour cela le maillage est condensé pour obtenir une solution plus proche à la réalité puisque les solutions numériques ou les solution par la méthodes des éléments finis généralement leur convergence dépend a la condensation du maillage (Figure IV 12).

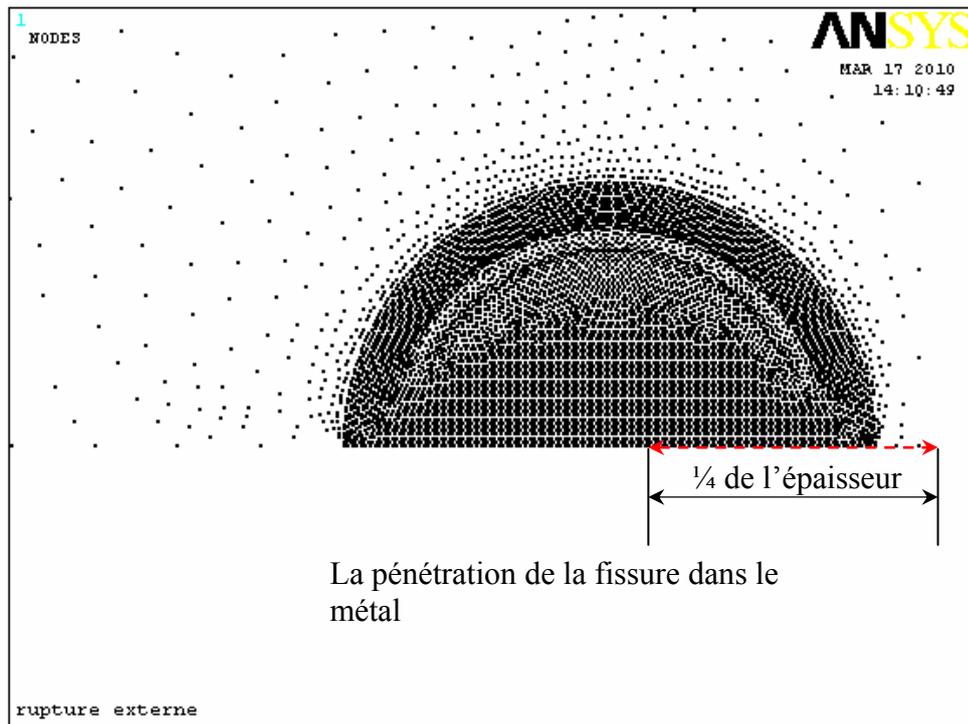


Figure IV.12. Noeuds de maillage avec un zoom de la zone au voisinage de la fissure.

IV.5.2. Résultat et discussion

Les figures IV 13 et IV.14 représentent la courbure ou la forme que prend la fissure après le gonflement sous l'effet de la pression ce qui permet de définir la réponse de la coque (tube) sous les effets de la pression en présence d'une fissure. La courbe contrainte-déformation de Von mises montré dans la figure IV.16 représente la solution au nœud 1717 de coordonnées (X= 0.606382 - Y=0.0) du font de la fissure. La contrainte de Von mises augmente et atteint un maximum d'une valeur de 377,7 (MPa) correspondant à une déformation de 0,00155312 % obtenu après 11,34 secondes suivie d'une chute 335,3 après 11,57 secondes puis des légères augmentations puis stabilisations jusqu'à rupture du pipe qui est obtenu à environ 13,5 secondes correspondant à une contrainte de 98 MPa et une déformation de 0,3 %.

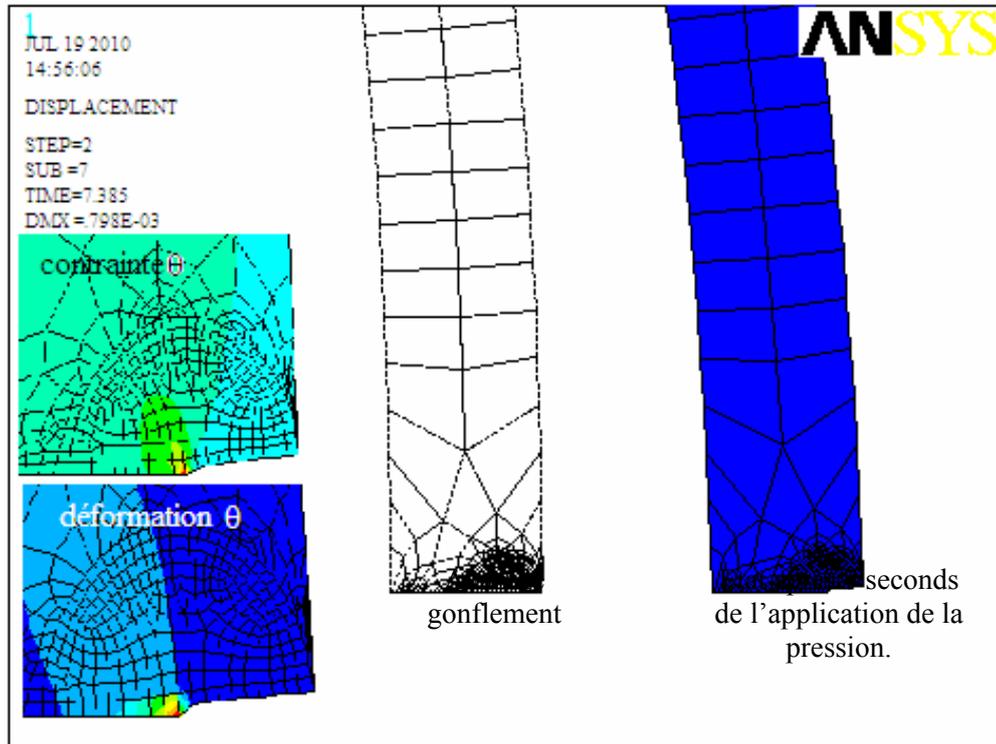


Figure IV.13. Forme de la fissure et champs des contraintes et déformations circonférentielle.

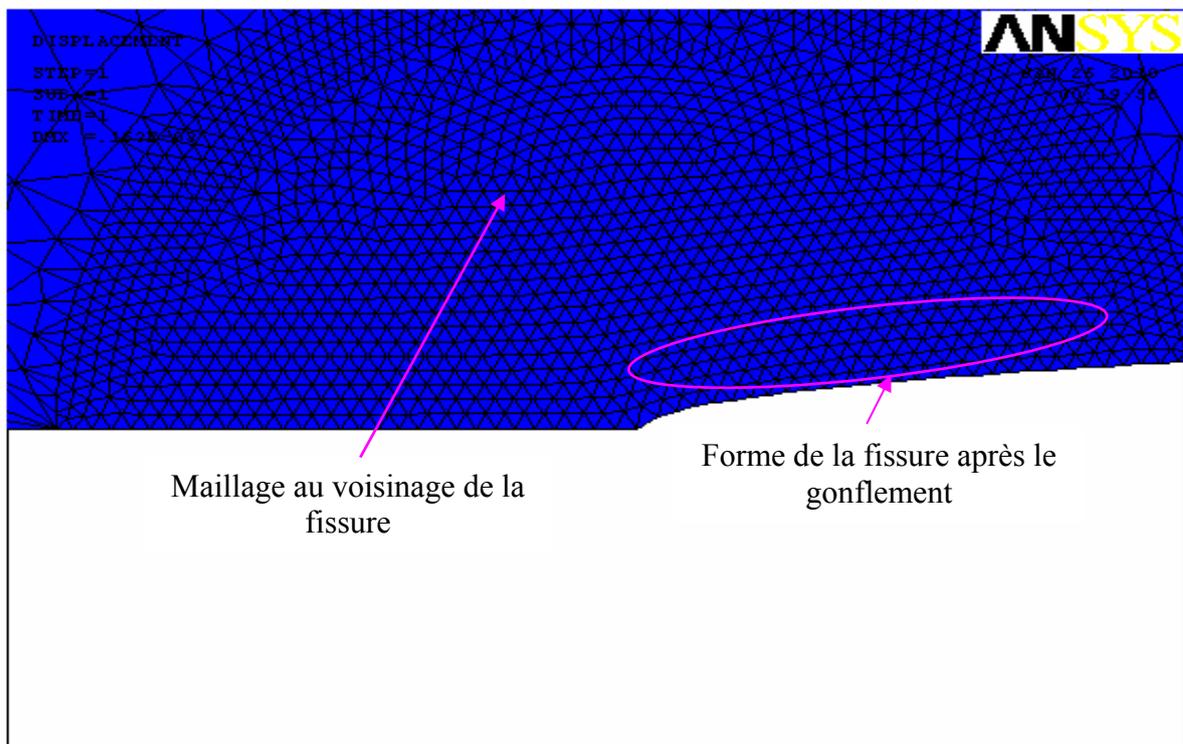


Figure IV.14. Evolution de la forme de la fissure sous effet de la pression.

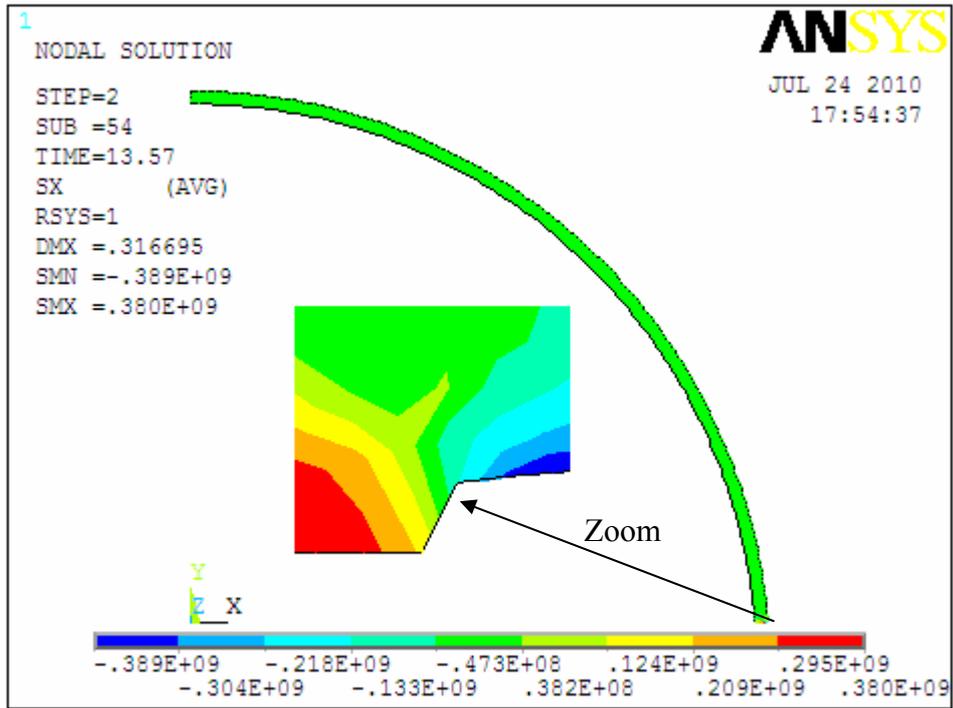


Figure IV.15. Distribution de la contrainte σ_{rr} suivant la direction de l'axe r .

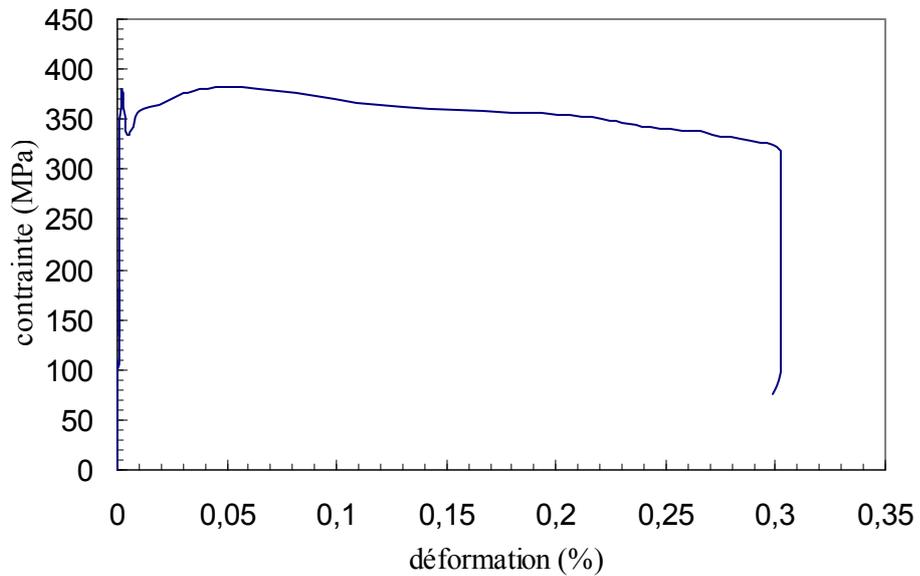


Figure IV.16. Contrainte-déformation de Von Mises du gonflement avec fissure externe.

- **Facteur d'intensité de contrainte** (Résultats tel qu'il est obtenu par ANSYS)

**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****

ASSUME PLANE STRESS CONDITIONS

ASSUME A HALF-CRACK MODEL WITH SYMMETRY BOUNDARY
 CONDITIONS (USE 3 NODES)

EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES: 1717 1696 1714
WITH NODE 1717 AS THE CRACK-TIP NODE

USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER 1
EX = 0.25500E+12 NUXY = 0.29000 AT TEMP = 0.0000

**** KI = 0.14129E+12, KII = 0.0000 , KIII = 0.0000 ****

IV.5.3. Réparation par matériaux composite de la paroi fissurée

L'épaisseur de réparation (renforcement) nécessaire e_r en matériaux composites pour rétablir les propriétés qui supportent les charges dépend de la pression appliquée P_{apl} au tube réparé, de la contrainte maximale σ_{max} choisis et du coefficient de sécurité désiré. Dans nos essais de simulation, une épaisseur de 2,4 mm du matériau de réparation est adoptée ce qui nous permet de trouver les résultats (Figure IV 17 à IV.19).

La distributions des contraintes de Von mises (σ_{eq}) au voisinage de la zone réparé (Figure IV 17) montre que σ_{eq} est maximale (2620 MPa) est situé a l'interface (composite/tube) au voisinage de la fissure, alors quelle est minimale (36,4 MPa) le long de la fissure.

L'analyse des résultats obtenus des distributions des déformations suivant l'axe r au voisinage de la zone réparé (Figure IV.18) montre la présence des déformation maximale de traction au niveau du pied de la fissure c'est-à-dire à l'interface composite/tube. Il est important de signalé aussi que la déformation maximale de compression (-0,448 %) obtenu est beaucoup plus importante que celle de la traction (0,106 %) et quelle situé à la tête de la fissure.

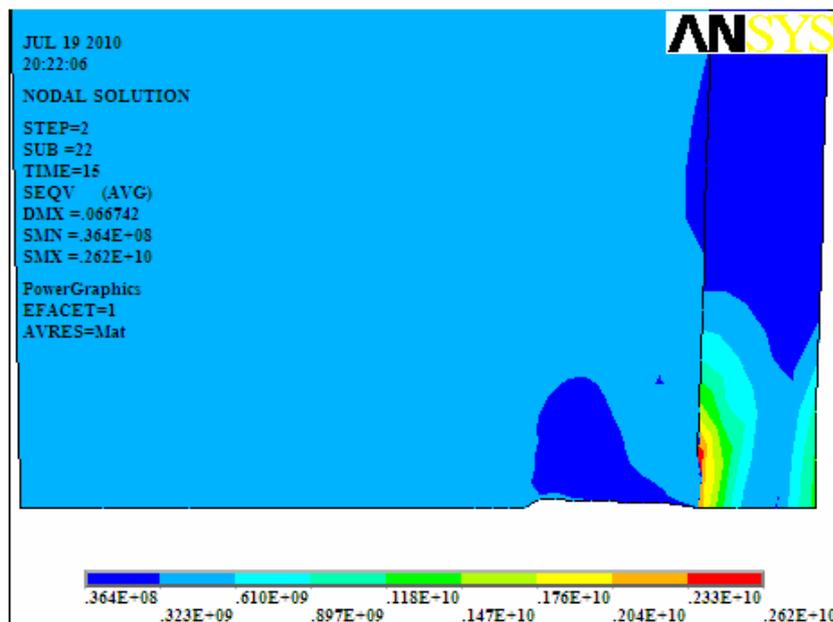


Figure IV.17. Champs de distribution des contraintes de Von mises (σ_{eq}) au voisinage de la zone réparé.

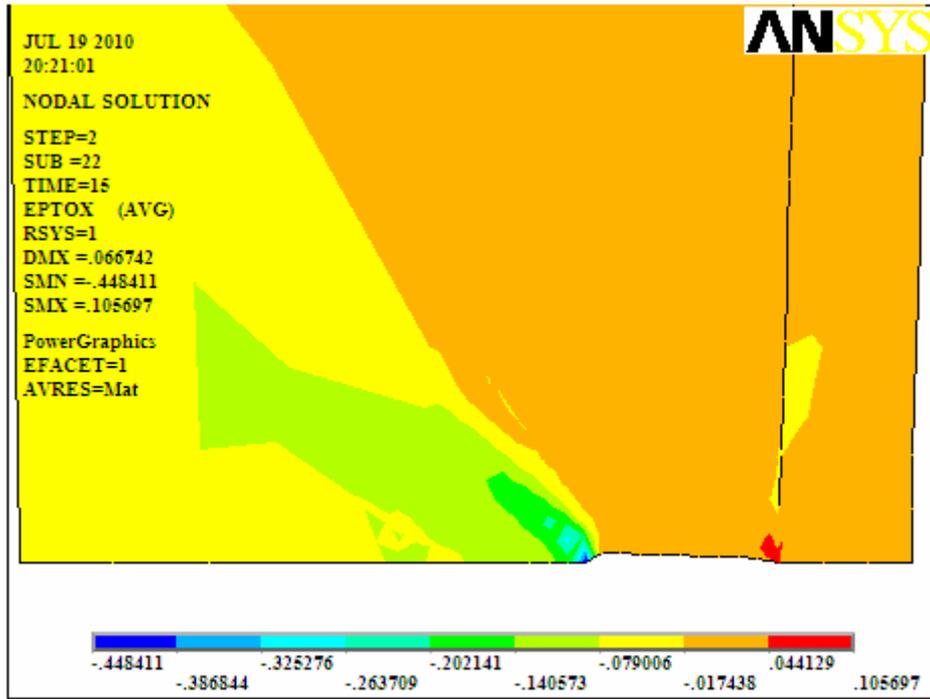


Figure IV.18. Champs de distribution des déformations suivant l'axe r au voisinage de la zone réparé.

La figure IV.19 représente l'évolution de la contrainte de Von mises d'un tube sans défaut, avec fissure sans et avec réparation par une bande en matériau composite chargé par une pression de 102 Bar pendant une durée de 15 secondes. Le tube réparé par l'enveloppe composite permet une augmentation très importante de la contrainte de Von mises de l'ordre de 2,5 fois par rapport au tube sans défaut (matériaux de base). Par contre, la réparation rigidifie la zone réparée ce qui se traduit par une faible déformation de l'ordre de 2,8 fois moins importante que pour un tube sans défaut.

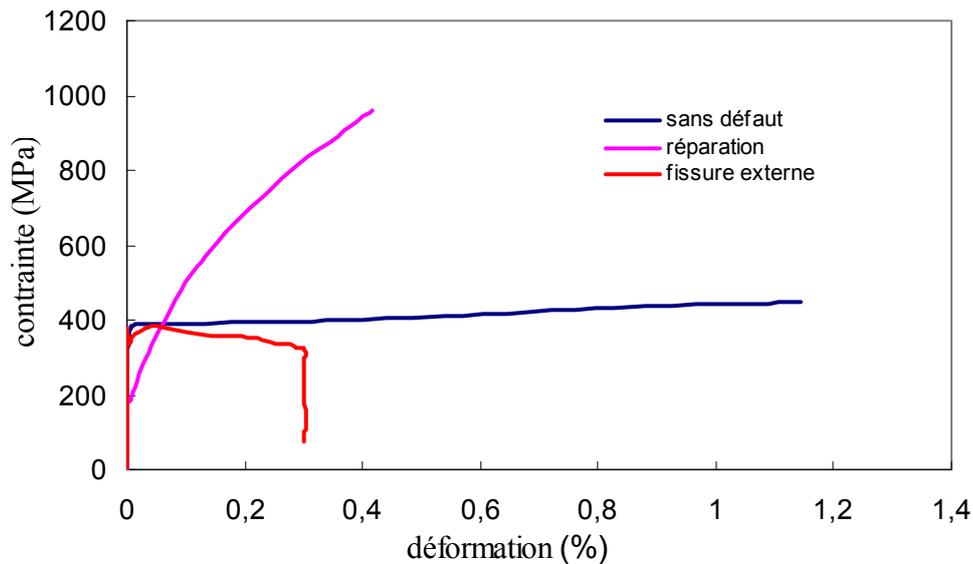


Figure IV.19. Courbe contrainte déformation de Von Mises du gonflement du pipe sans défaut, avec fissure externe et réparé.

IV.6. Simulation en 3D d'essai de gonflement de pipe sans endommagement

IV.6.1. Discrétisation de gonflement de tube sans défaut localisé

Le modèle discrétisé (Figure IV.20) représente un demi tube (la moitié dans le sens de la longueur du tube) le maillage adopté comporte 181772 éléments et 365404 noeuds. Au vue de la difficulté de calcul et la non disponibilité d'une station de calcul puissante, les dimensions de simulation en 3D sont prise 1/4 d'un tube réel soit : 3 m de longueur et 3, 575 mm et diamètre de 304.8 mm (12 in). Les conditions aux limites considèrent l'encastrement parfait sur une extrémité du tube et les conditions de symétrie dans l'autre (Figure IV.21). La répartition de la pression interne dans le tube est présentée dans la Figure IV.22.

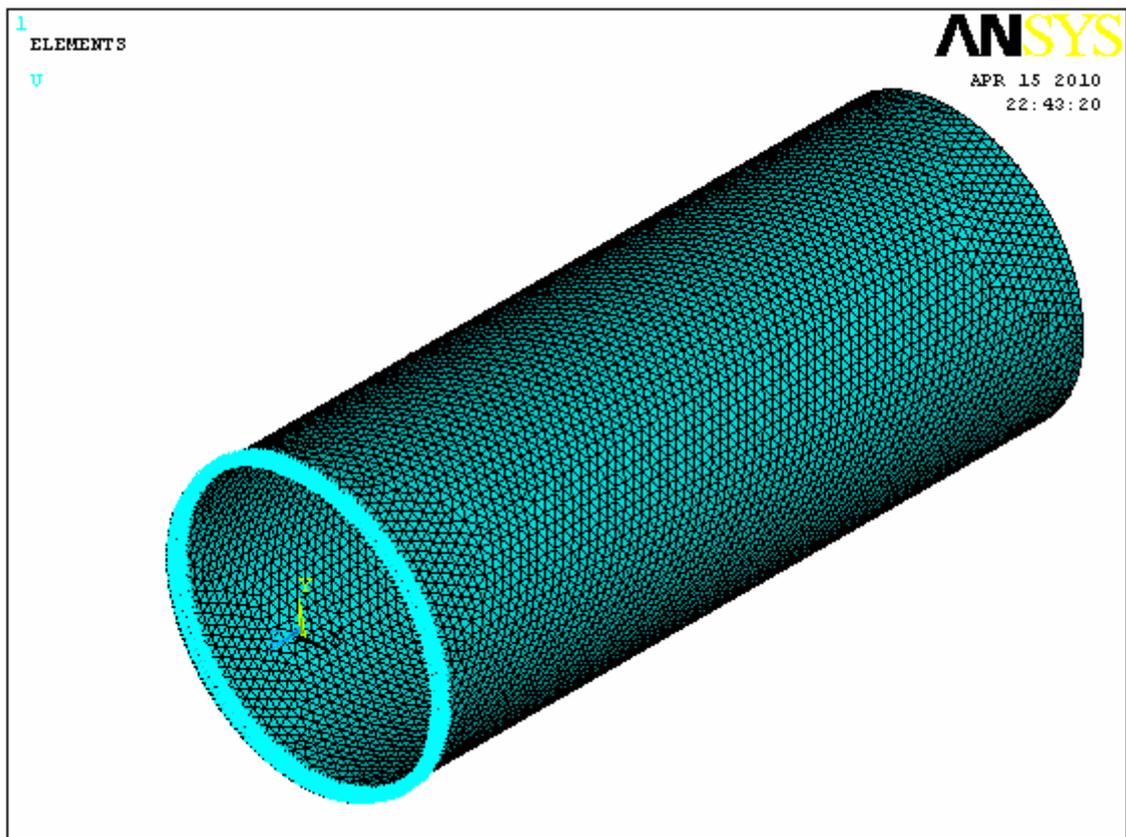


Figure IV.20. Densité de maillage du demi-modèle.

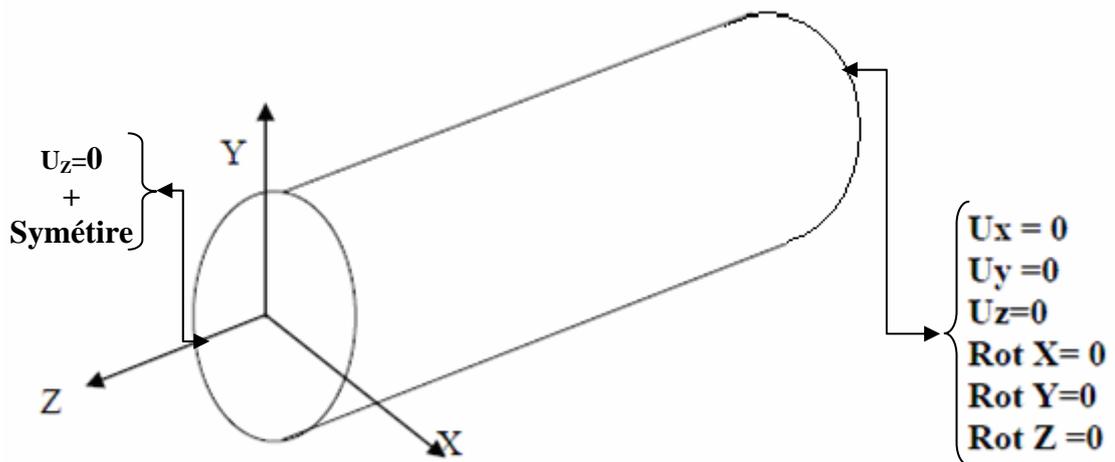


Figure IV.21. Conditions aux limites pour la pression intérieure.

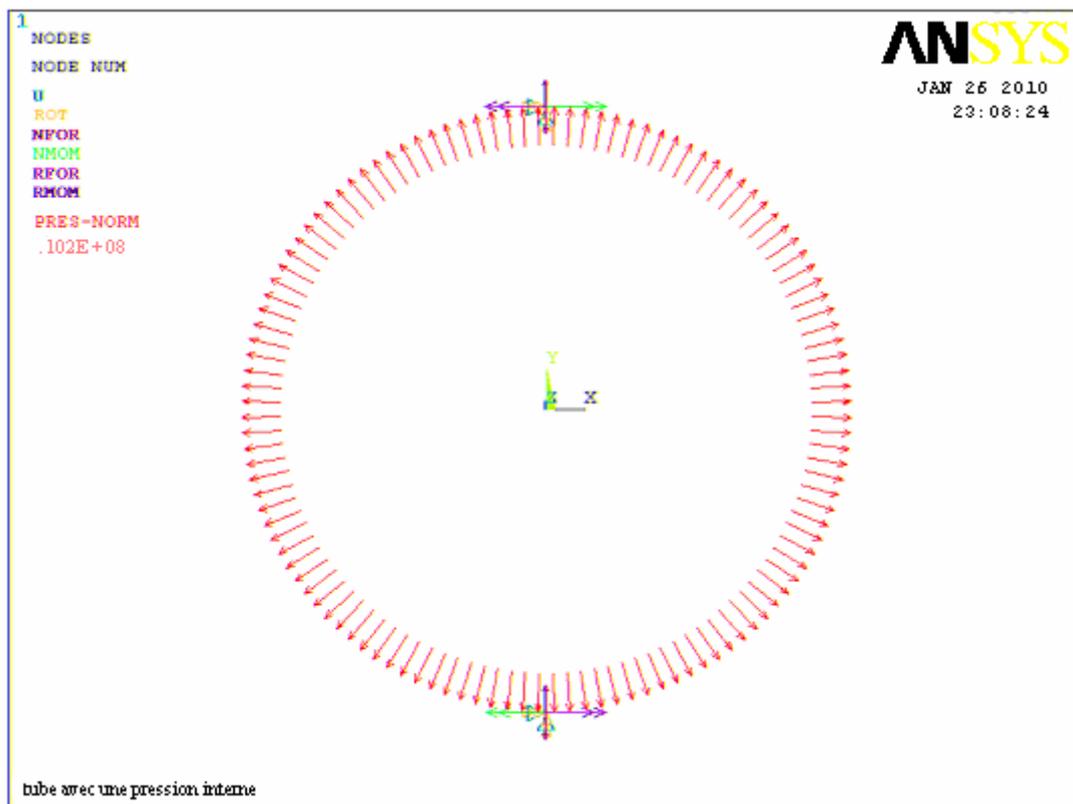


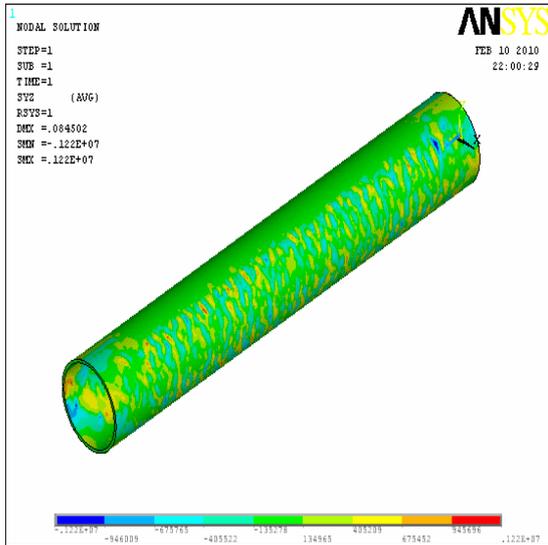
Figure IV.22. Application du chargement par une pression de 102 bars à l'intérieur du tube.

IV.6.2. Analyse des résultats

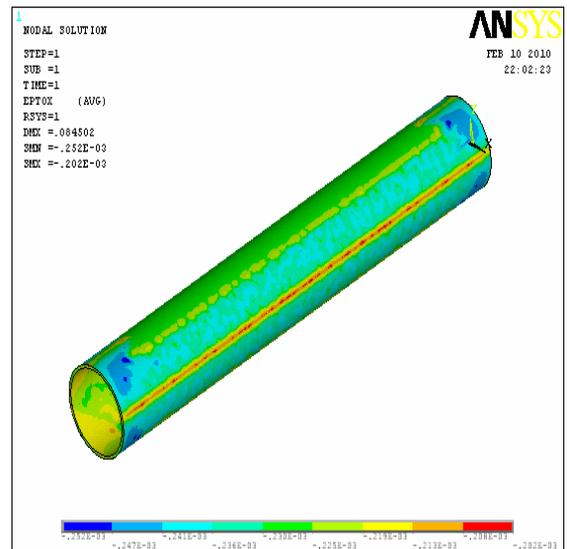
a) Comportement de tube sans endommagement sous une pression intérieure

Après la réalisation des simulations du gonflement d'un tube sans défaut permet de trouver les résultats présentés dans les figures IV.23 à IV.26. L'analyse des champs des

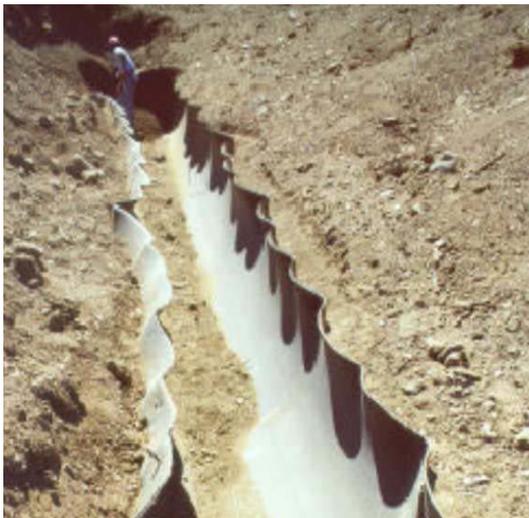
contraintes et les champs de déformations (Figure IV.23) permet d'affirmer que les déformations maximales sont dans le sens de la longueur du tube et ceci est en bonne concordance avec les expériences pratique d'éclatement de pipeline trouvée dans la littérature (Mannucci et Demofonti, [44]).



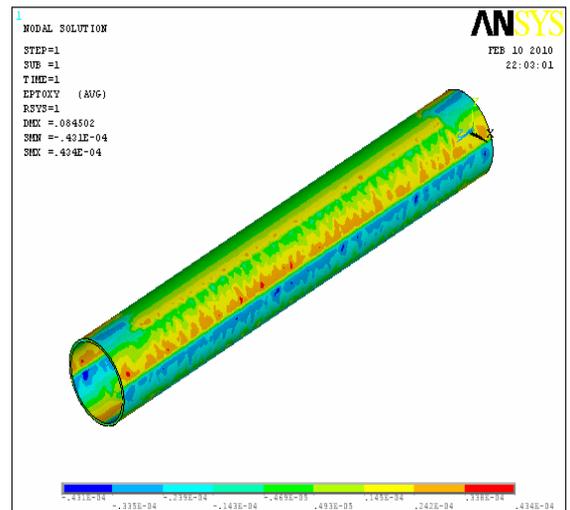
Répartition des contraintes dans l'axe z.



Répartition de déformation dans l'axe x



Eclatement d'un pipeline [45].



Répartition de déformation dans le plan xy

Figure IV.23. Répartition des contraintes et des déformations de tube sous une pression interne d'un tube sans défaut.

La distribution des champs de contrainte de Von mises (Figure IV.24) montre aussi que les contraintes maximales sont dans le sens de la longueur du tube. La répartition des contraintes suivant l'axe z (figure IV.25), la solution dans les noeuds externe du tube montre que le pique de la contrainte maximale se trouve très proche de l'encastrement.

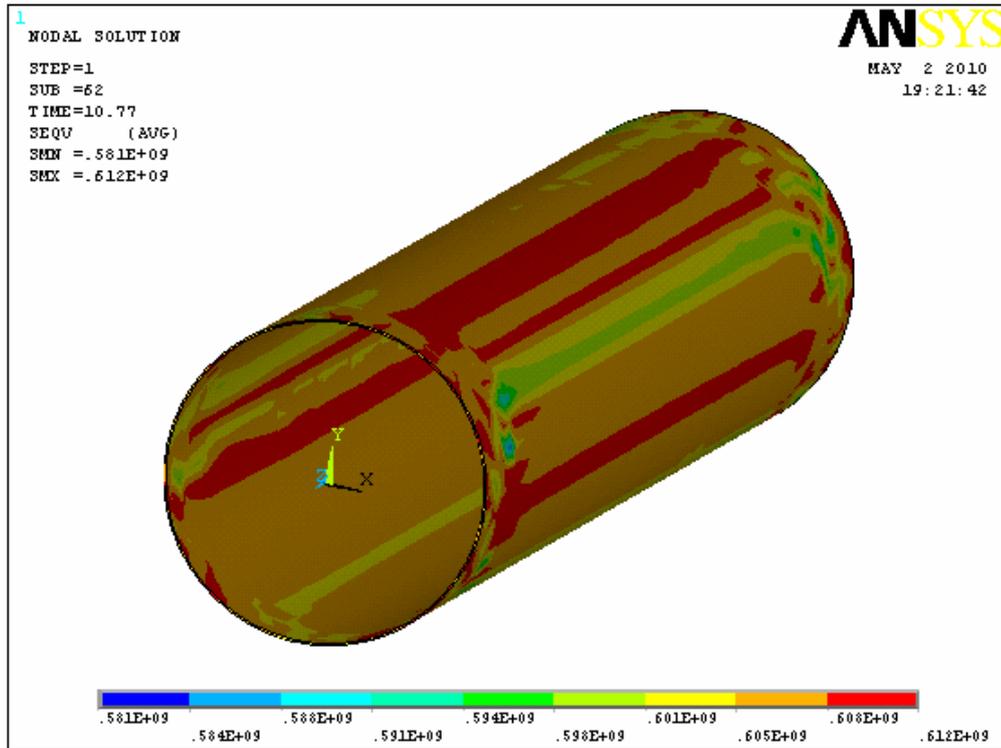


Figure IV.24. La distribution de contrainte de Von mises dans un pipe sans défaut.

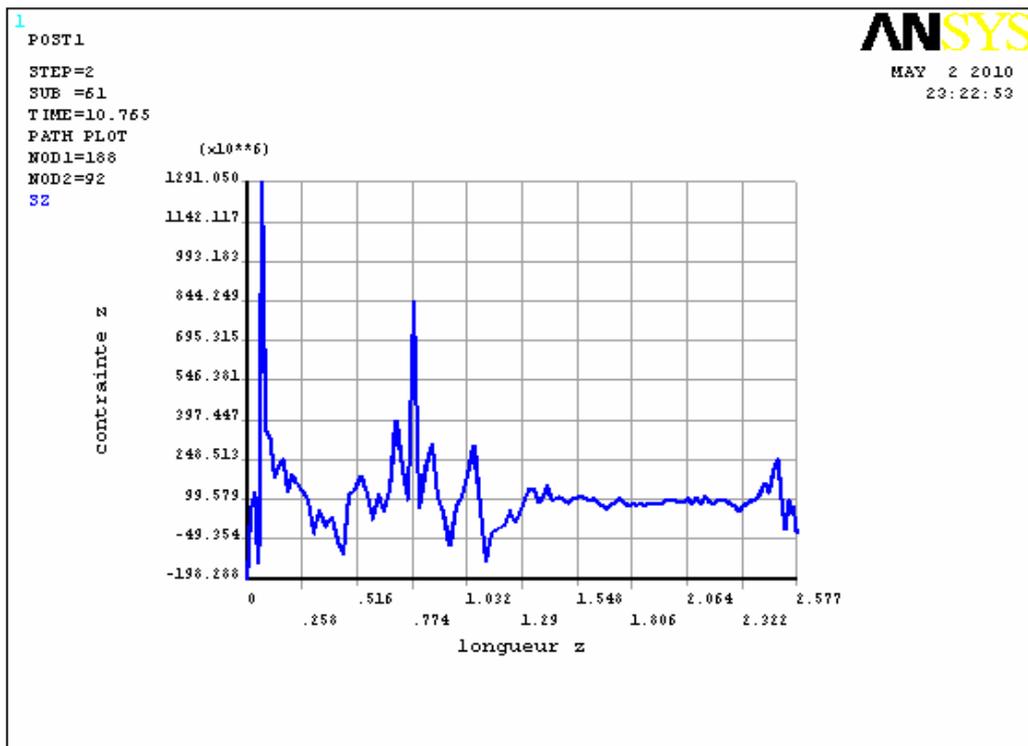
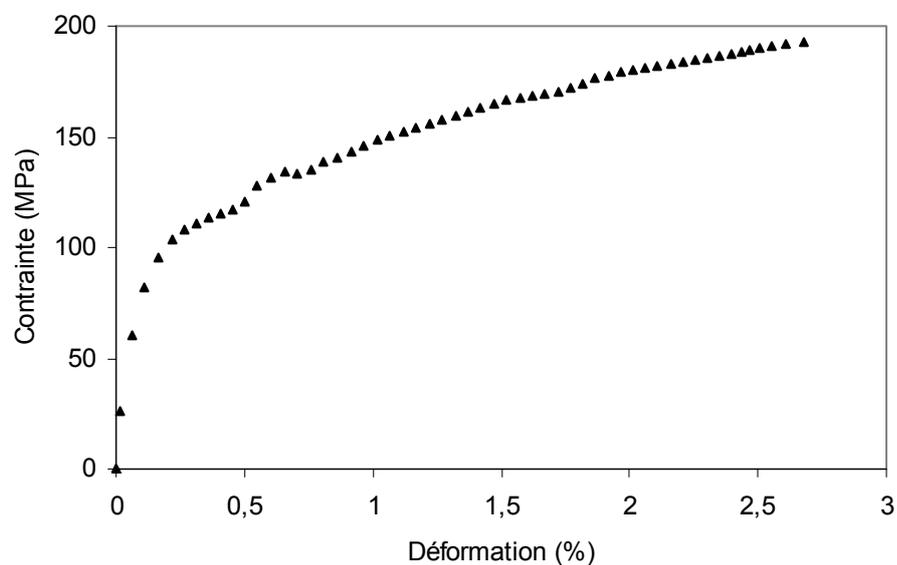
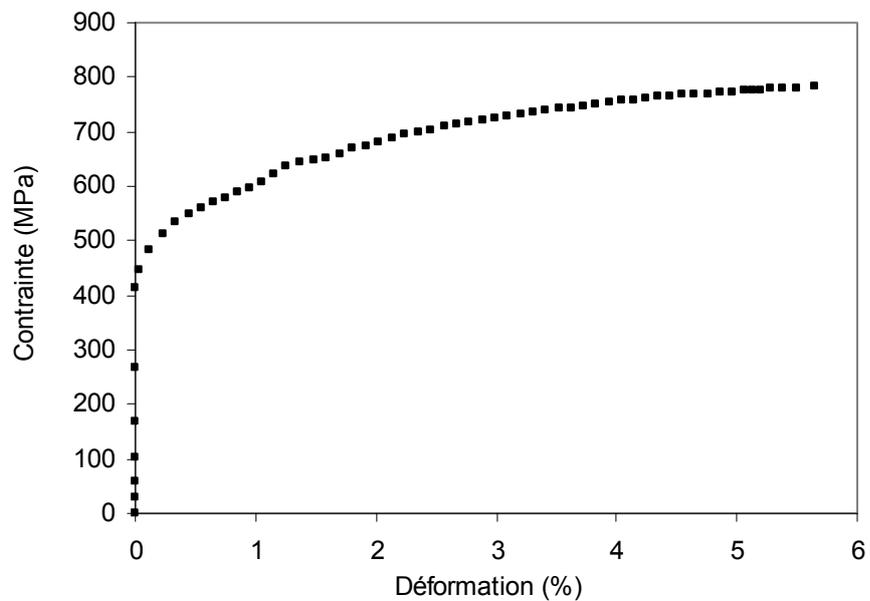


Figure IV.25. La distribution des contraintes suivant la longueur du pipe.

La figure IV.26 représente l'évolution des contraintes en fonction de la déformation suivant les axes X, Y et Z d'un pipe sans défaut sous l'effet du gonflement. Les solutions sont présentées dans le nœud numéro 20694, situé au voisinage de l'encastrement, de

coordonnée de $X = -4,78$ mm, $Y = 148,77$ mm et $Z = -1406,50$ mm, cette évolution est pratiquement bilinéaire et le changement de la pente s'effectue approximativement au niveau de la moitié de la contrainte maximale. L'analyse de ces résultats permet de montrer d'une part que les contraintes et les déformations suivant les axes Y et Z sont comparables, d'autre part la contrainte suivant l'axe X est 4 fois plus importante et la déformation est le double de celle suivant les axes Y et Z. Il est important de noter aussi que le premier palier de la contrainte suivant l'axe X est verticale c'est à dire qu'il se trouve sur l'axe des contraintes pour les petites déformations.



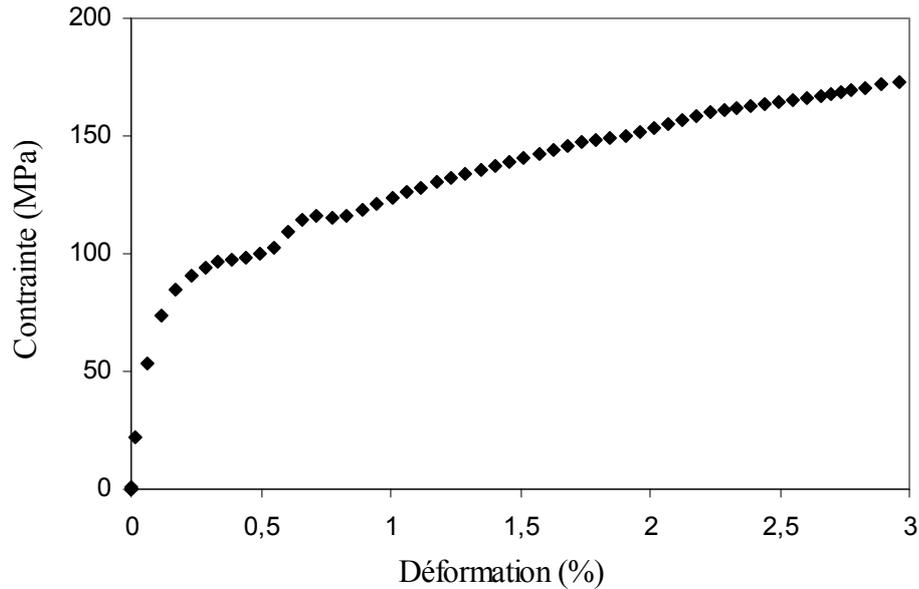


Figure IV.26. Courbe contrainte-déformation suivant les axes X, Y et Z.

b) Pipe sujet à la corrosion externe

On considère un défaut de corrosion avec une perte de matière externe a travers l'épaisseur du pipe a une profondeur de $1/4$ de e (e est l'épaisseur du pipe) et d'une longueur égale à 200 mm et un arc de cercle de 30° .

La résolution de ce problème par ANSYS permet de montrer que les déformations maximales dans le plan de cisaillement $r\theta$ (Figure IV.27) se trouve dans la zone corrodée et dans le sens longitudinale du tube, ceci est en bonne concordance avec la réalité et l'étude expérimentale de Duell *et al* [4] présenté sur la figure IV.28. Les déformations maximale se trouve dans une parti localisé au centre de la zone corrodée alors que la rupture est obtenu sur toute la parti corrodé [4], ceci est due au faite que les simulations sont effectués jusqu'à l'état plastique du matériau et l'expérience de Duell *et al* [4] jusqu'à la rupture (c'est-à-dire l'éclatement du pipe).

La distribution des champs de contraintes de Von mises montre pratiquement qu'il y a une concentration des contraintes maximale pratiquement dans toute la zone corrodée (Figure IV.29). La zone corrodée perd 29 % de la contrainte de Von mises ; en d'autres termes la contrainte maximale de Von mises diminue de 612 MPa pour une pipe sans défaut jusqu'à 435 MPa à cause du défaut de corrosion.

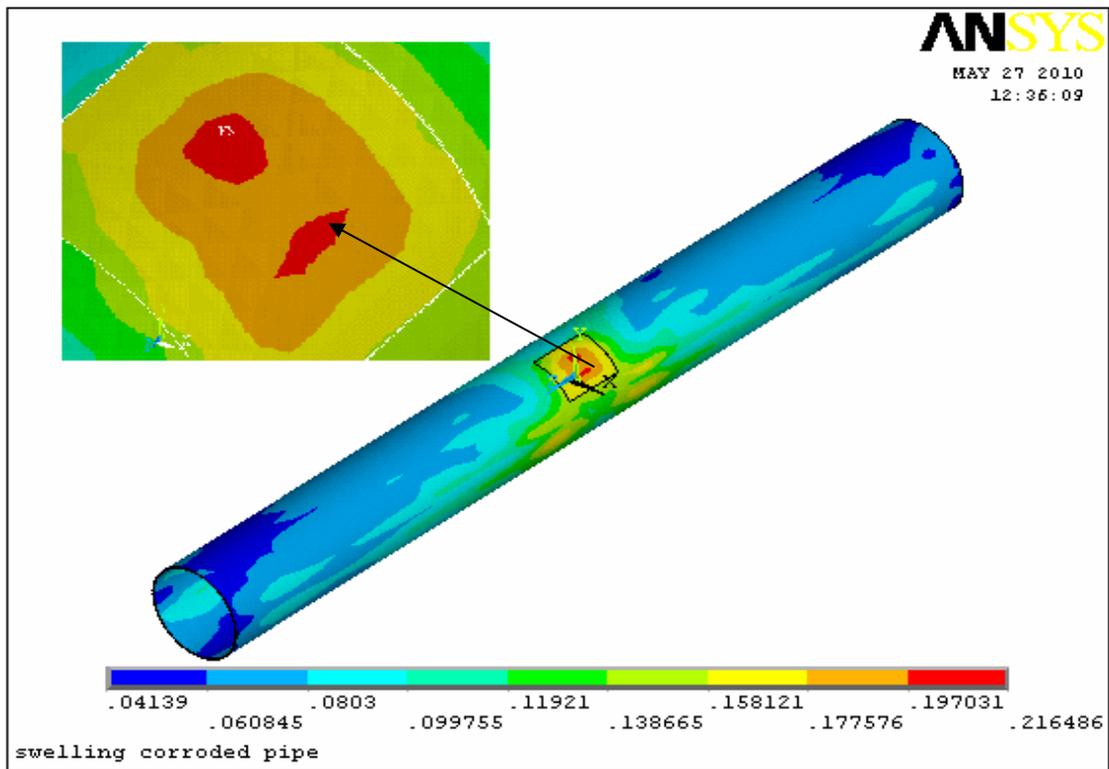


Figure IV.27. La distribution des déformations dans le plan de cisaillement $r\theta$.



Figure IV.28 Exemple d'un tube éclaté avec un défaut axisymétrique [4].

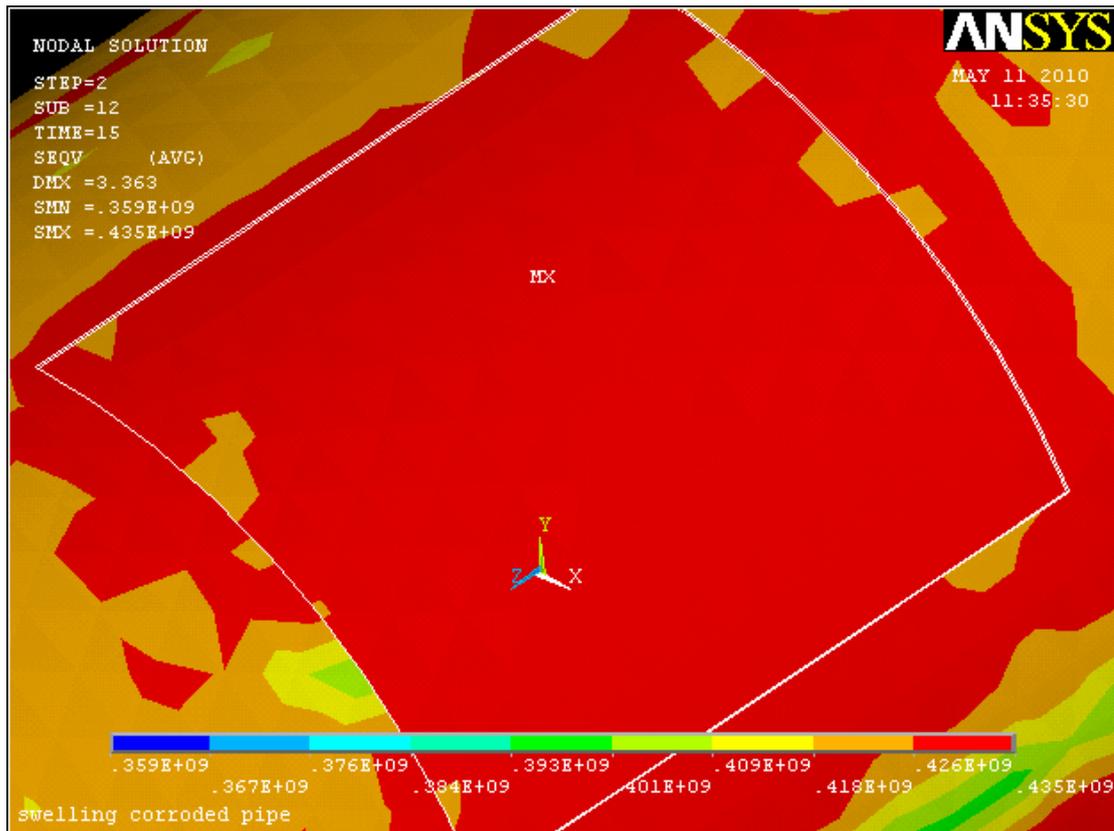


Figure IV.29. La distribution des contraintes de Von mises dans la zone corrodée.

c) Réparation de défaut de corrosion d'un pipe

La réparation du pipe corrodé par matériaux composite est plus fiable si on connaît l'épaisseur nécessaire du composite qui permet de rétablir le pipe à un l'état de bien supporté les charges et les conditions de service, c'est pour cela qu'il faut calculer théoriquement ceci à partir des théories et des normes qui existent dans le chapitre II par l'application de la relation (II.54) ; la résolution de cette relation permet d'avoir une épaisseur $t_{repair}=2,0$ mm. La résolution de la relation (II.55) du chapitre II permet de trouver que le nombre de couches nécessaire n_A égale à 12. La réparation de la corrosion consiste tout d'abord à remplir la perte de métal par une résine avant l'application d'une enveloppe composite CFRP (Figure IV. 30). La couche de résine est utilisée d'une part comme un adhésif entre le composite et le matériau de base X70 et d'autre part elle permet de garantir une distribution uniforme des contraintes entre les couches et les fibres.

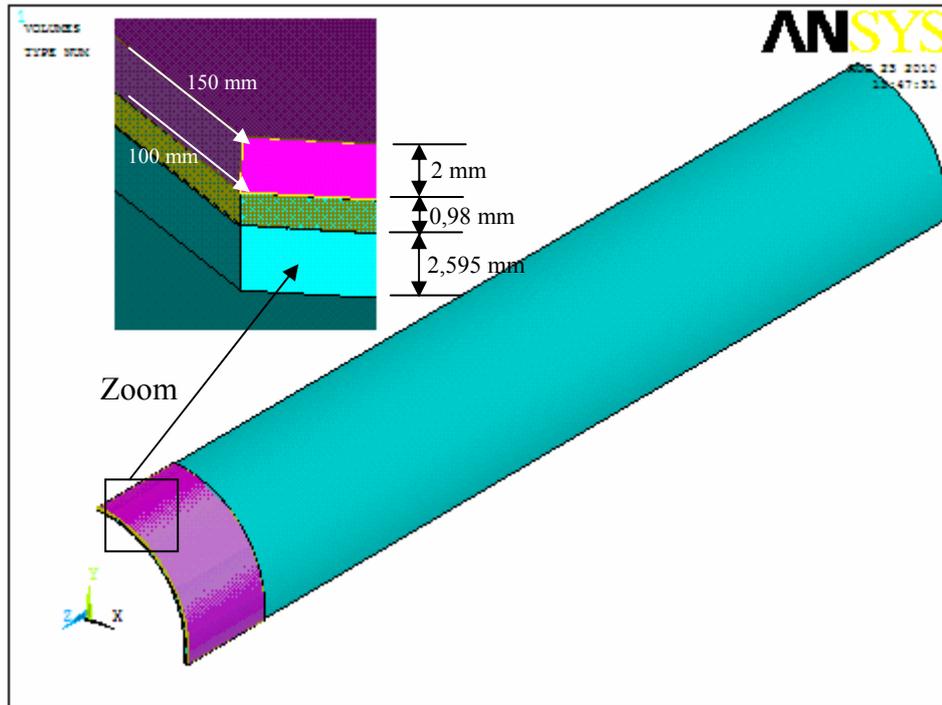


Figure IV.30. Description dimensionnelle de la zone de réparation.

La figure IV.31 représente la distribution de contrainte de cisaillement $\sigma_{r\theta}$ d'un tube corrodé et réparé par matériaux composites CFRP. Contrairement au cas précédent (tube corrodé et non réparé) la zone de concentration de contrainte de cisaillement maximale $\sigma_{r\theta}$ ne se trouve plus dans la zone corrodée (Figure IV.27) mais elle est située dans le matériau de base (non défectueux) de part et d'autre de la zone réparée (Figure IV.31) d'où d'efficacité de la réparation du défaut.

Les résultats de simulations obtenues sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux de **Chris Alexander** [46] (Figure IV.32) ; la zone de concentration des contraintes est similaire à la forme de rupture du pipeline.

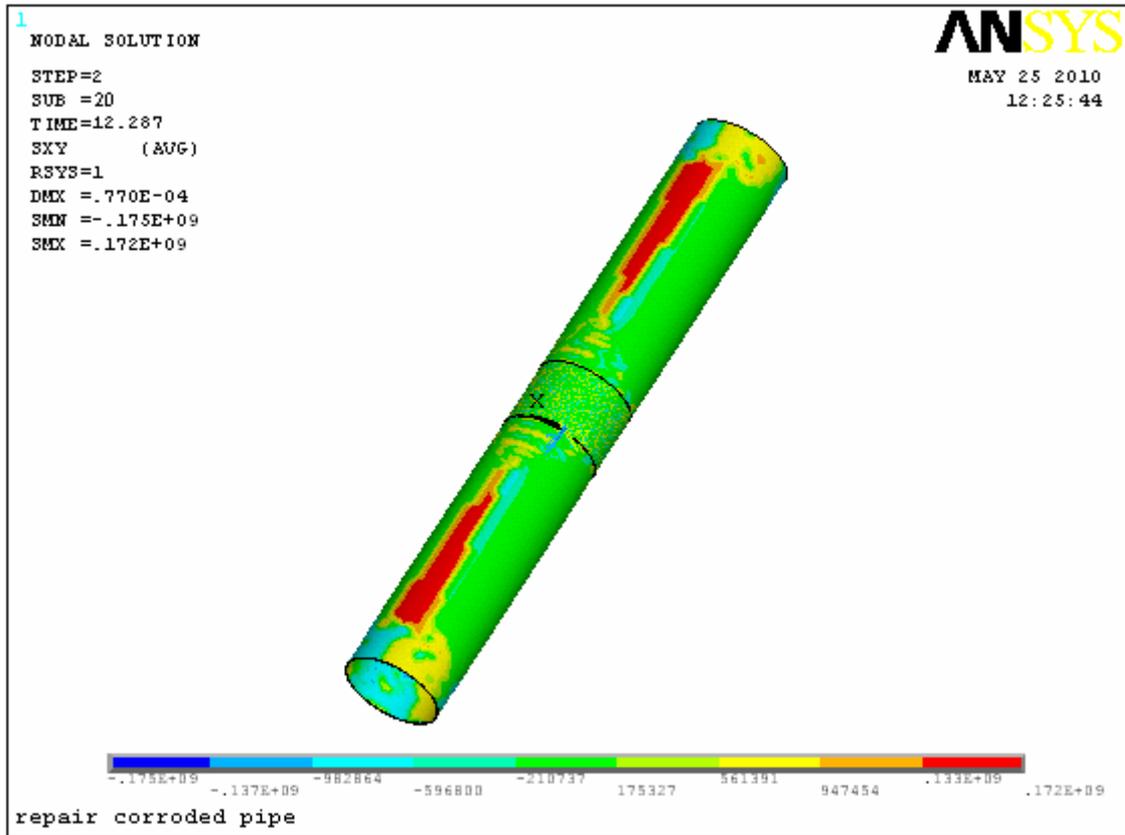


Figure IV.31. Distribution des contraintes dans le plan de cisaillement $r\theta$ d'un pipe corrodé et réparé.



Figure IV.32. Rupture dans la section du matériau de base après un test d'éclatement [46].

La figure IV.33 représente l'évolution des contraintes/déformations de Von mises de trois cas pipe sans défaut, avec la présence de défaut de corrosion, et un pipe corrodé et réparé. Cette figure montre que la courbe contrainte/déformation du tube corrodé et réparé est au dessus de celle d'un tube sans défaut et un tube corrodé non réparé d'où l'efficacité de la réparation.

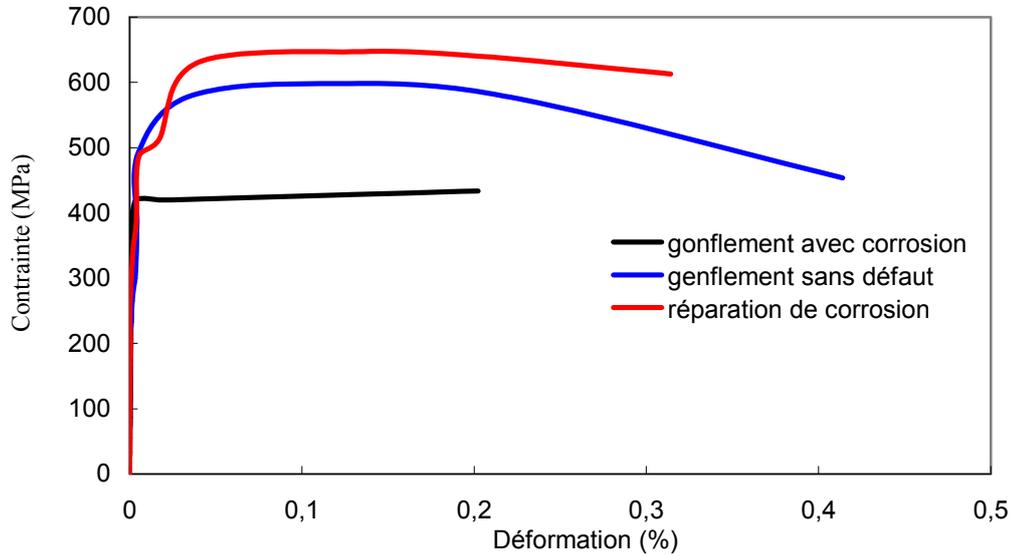


Figure IV.33. Les courbes contrainte-déformation de Von mises de gonflement de tube sans défaut avec défaut de corrosion et leur réparation.

d) Pipe sujet à une fissure longitudinale

Le problème de gonflement de pipe fissuré est traité par une simulation de 1/4 de pipe vue la double symétrie et les condition aux limite sont prise les mêmes que pour un pipe sans défaut.

On considère un pipe avec une fissure longitudinale de longueur de 200 mm a travers toute l'épaisseur et le pipe fissuré est soumis à une pression de gonflement de 102 bar.

Le critère de Von mises montre que la concentration de contrainte est à la tête de la fissure dans la zone plastique qui est créer sous l'effet de la pression qui se propage dans le plan $Z\theta$ (Figure IV.34) et la contrainte maximale atteint une valeur de 596 MPa.

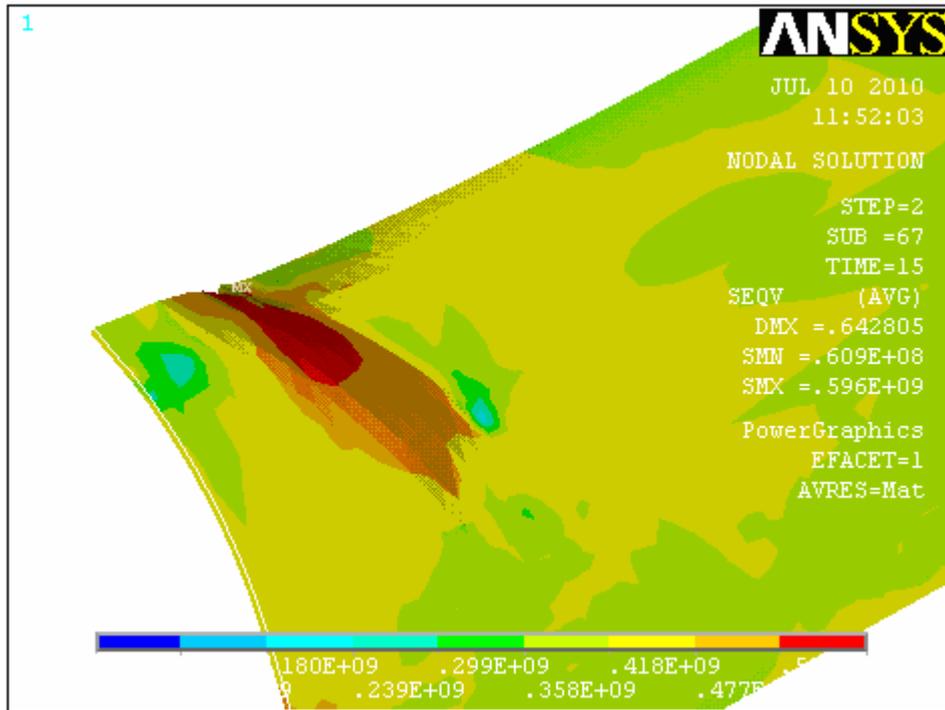


Figure IV.34. Distribution de contrainte Von mises lors du gonflement de pipe sujet à une fissure longitudinale.

La résolution du problème du gonflement de pipe sujet à une fissure longitudinale dans les coordonnées cartésienne (Figure IV.35), dans le plan XZ est similaire au contrainte de Von mises et la contrainte σ_{xz} maximal est égale à 270 MPa et la concentration des contraintes se propage dans le sens circonférentiel du pipe.

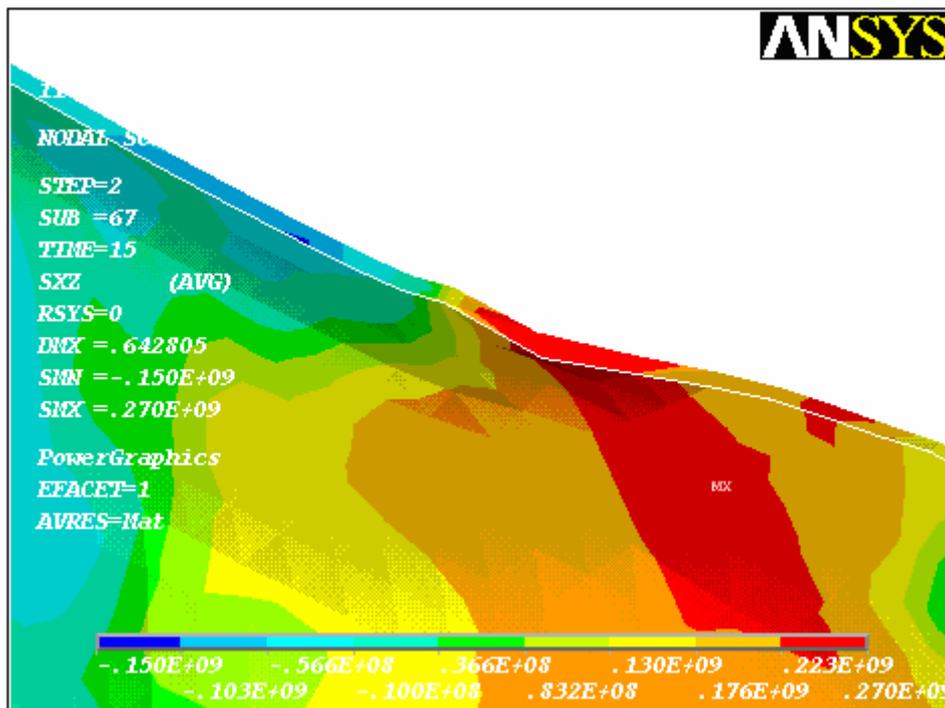


Figure IV.35. Distribution de contrainte de cisaillement lors du gonflement de pipe dans le plan XZ.

L'évolution des contraintes σ_{yz} en fonction des déformation ε_{yz} s'effectue en deux phases (Figure IV.36) : une augmentation linéaire très rapide pour de faible déformation jusqu'à une contrainte de 150 MPa correspondant a une déformation de 0,17 %, alors que cette évolution est lente et non linéaire dans la deuxième phase jusqu'à une contrainte de 300 MPa correspondant a une déformation de 4,05 %.

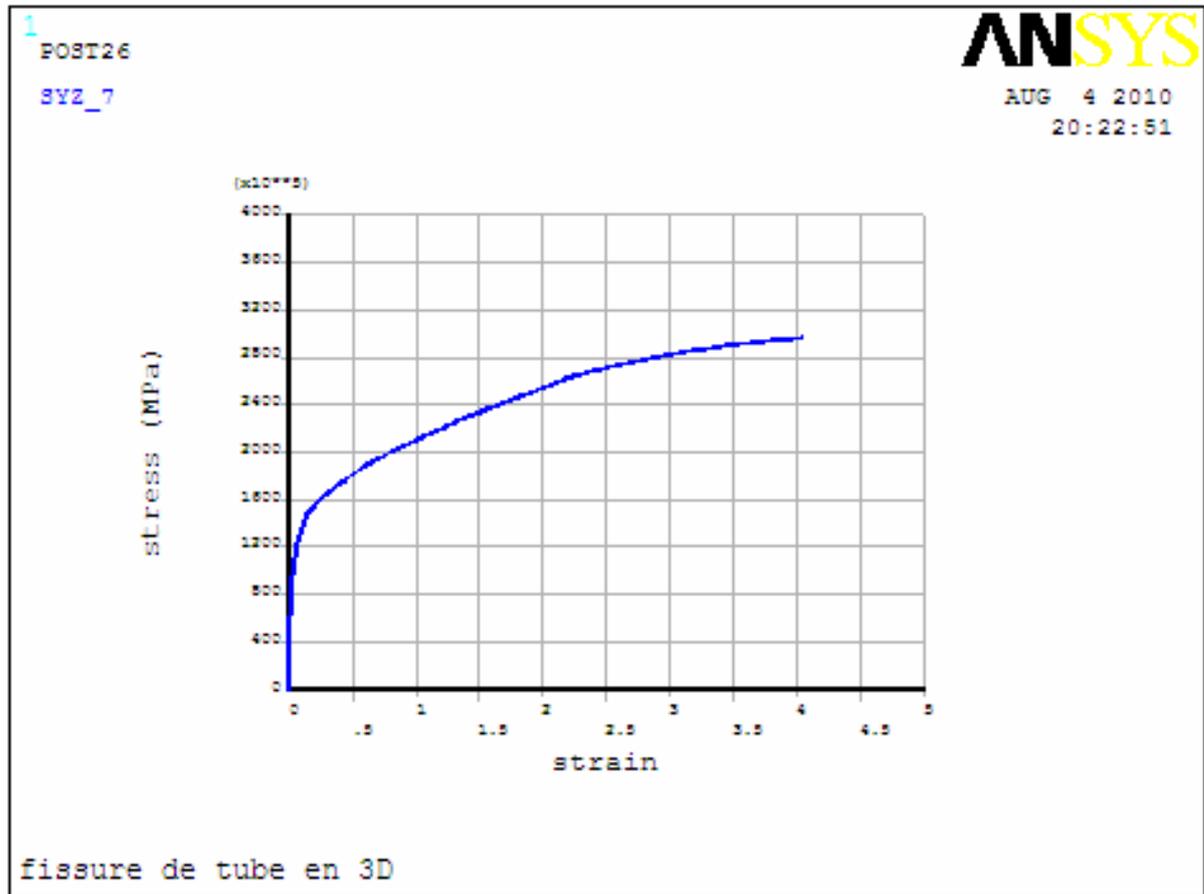
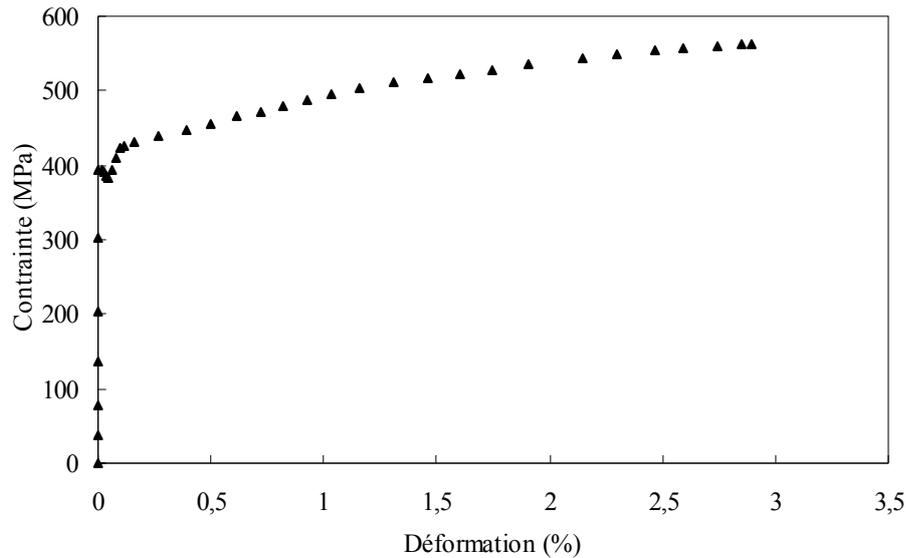


Figure IV.36. Courbe contrainte-déformation ($\sigma_{yz}/\varepsilon_{yz}$)

La figure IV.37 présente la variation de contrainte de Von mises en fonction de la déformation qui se déroule en trois phases : une augmentation linéaire très rapide de contrainte jusqu'à une valeur de 395 MPa correspondant a une déformation de 0,0033 %, la deuxième phase est caractérisé par une légère décroissante de la contrainte jusqu'à 382 MPa correspond a une déformation de 0,0485 % puis une légère reprise jusqu'à la troisième phase ou la contrainte en fonction de la déformation évolue d'une manière pratiquement linéaire jusqu'à un seuil de 563 MPa correspondant a une déformation de 2,9 %.



IV.37. Contrainte-déformation de Von mises avec la présence d'une fissure en 3D.

e) Réparation d'une fissure longitudinale par matériau composite

Le pipe est enveloppé par un matériau composite CFRP jusqu'à une épaisseur de 2,4 mm contenant 12 couches de tissus. La zone défectueuse par une fissure de même caractéristique dimensionnel de l'essai précédent (fissure de 200 mm de longueur) et le pipe est chargé par une pression de 102 bar.

A partir des deux figures IV.38 et IV 39 correspondant respectivement a la distribution des champs de contrainte de Von mises et des déformations de cisaillement dans le plan YZ, on trouve que l'épaisseur 2,4 mm de l'enveloppe composite ne support pas la charge de pression. Ceci peut être expliqué par la présence de délaminage entre les couches et déchirure de l'enveloppe composite d'où le besoin d'augmenter l'épaisseur du matériau de réparation.

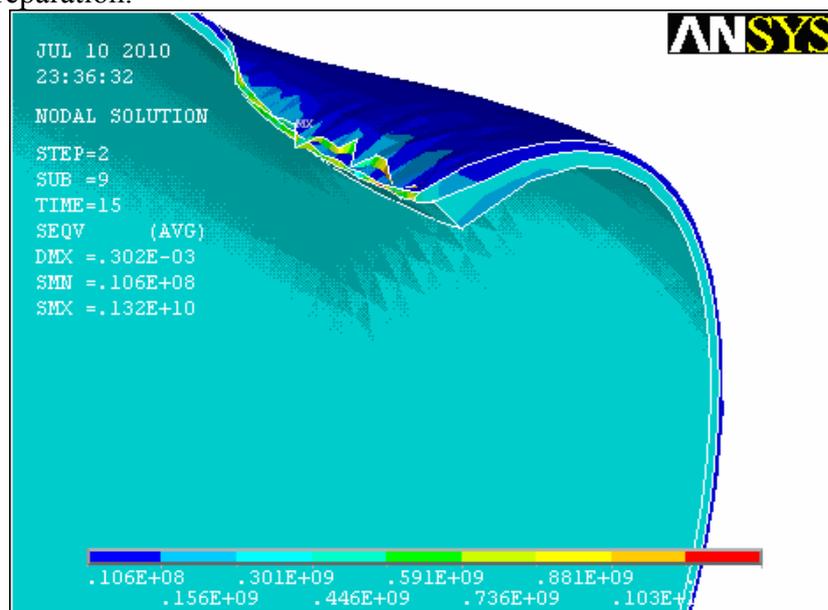


Figure IV.38. Distribution des contraintes de Von mises d'un pipe fissuré et réparé par une enveloppe en matériau composite.

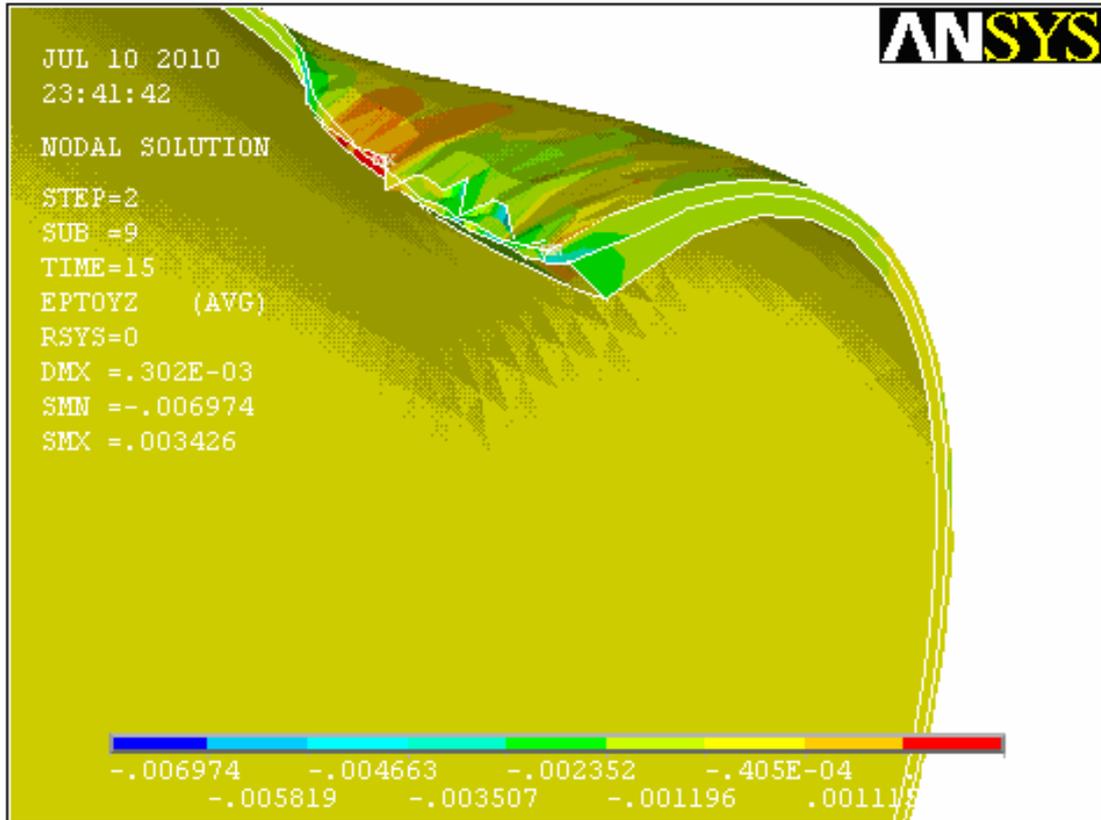


Figure IV.39. Distribution des déformations de cisaillements dans le plan YZ d'un pipe fissuré et réparé par une enveloppe en matériau composite.

f) Augmentation de l'épaisseur du matériau de réparation CFRP

L'augmentation de l'épaisseur de l'enveloppe composite est influé positivement sur le comportement mécanique du tube, c'est pour cela deux tentative sont réalisé a savoir avec une épaisseur de 3,2 mm et 4,8 mm. Les calculs avec une enveloppe d'épaisseur de 3,2 mm n'a pas donnée satisfaction d'un point de vue résistance et celle de 4,8 mm est représenté dans les figures IV.40 et 41.

La distribution des contraintes de Von mises (Figure IV.40) et des déformations ϵ_{rz} (Figure IV.41) montre respectivement que les contraintes et les déformations maximales se trouvent dans le matériau de base et non plus dans zone fissuré et réparé (l'enveloppe composite).

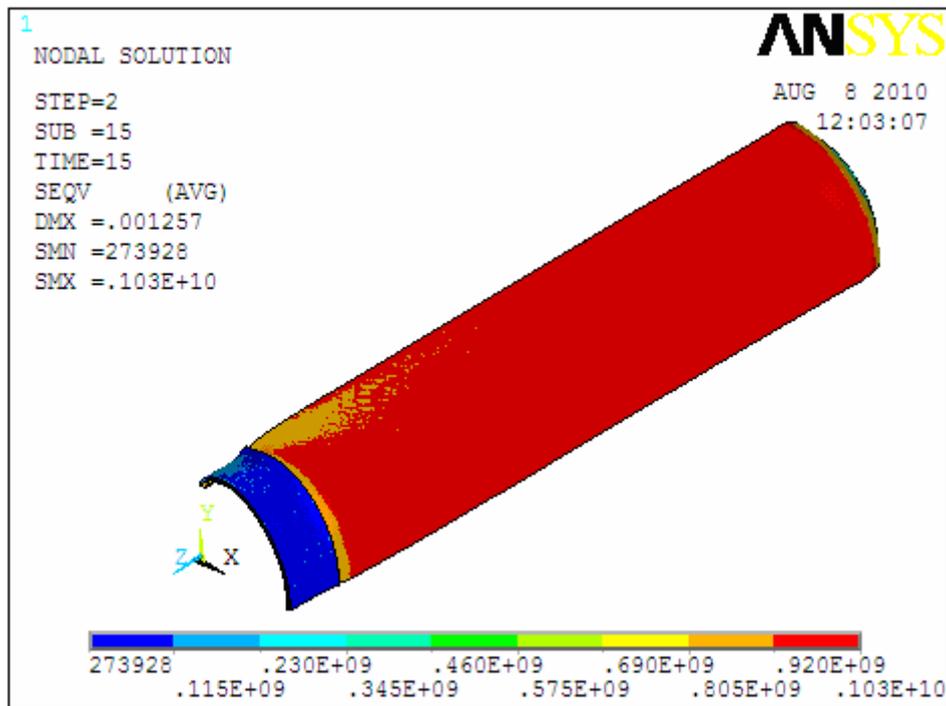


Figure IV.40. Distribution des contraintes de Von mises d'un tube fissuré et réparé par une enveloppe en composite d'épaisseur 4,8 mm.

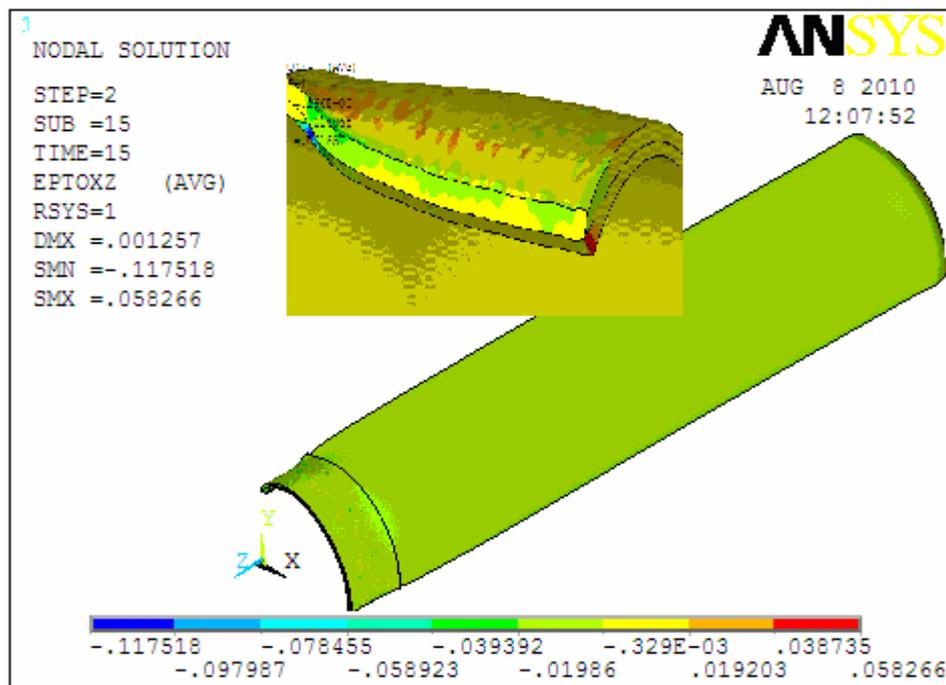


Figure IV.41. Répartition de déformation ε_{rz} d'un tube fissuré et réparé par une enveloppe en composite d'épaisseur 4,8 mm.

g) Réparation de la fissure par soudure

La réparation par soudure consiste à usiné la zone fissuré est la rendre en forme d'un V, d'où une augmentation du volume de la fissure pour mieux remplir le matériau de

soudure et augmenté le rayon du bec de la fissure (dans notre cas 2 mm) pour freiner sa propagation.

La répartition des déformations ε_{rr} suivant l'axe r (Figure IV.42) et de Von mises (Figure IV.43) montre que ces déformations sont maximales loin de la zone de fissuré et réparé par soudure.

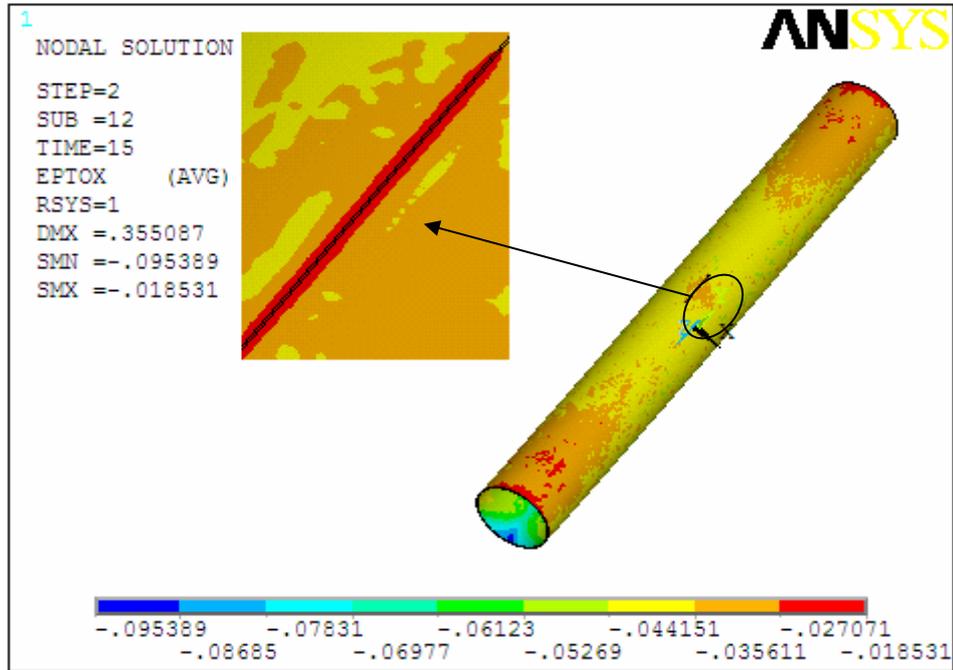


Figure IV.42. Répartition des déformations ε_{rr} d'un tube fissuré et réparé par soudure.

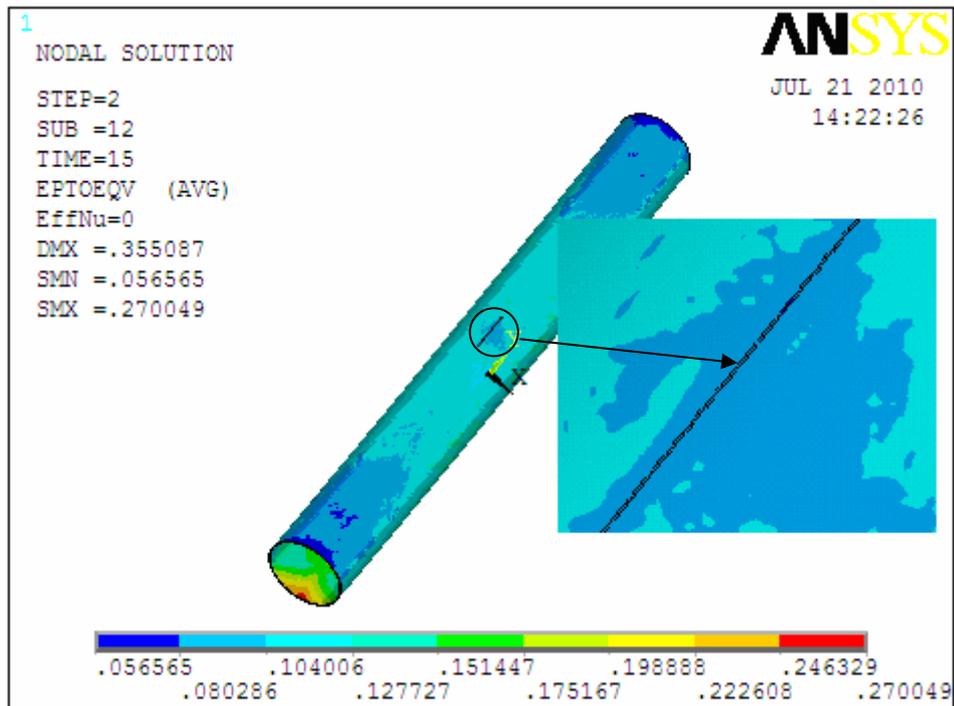


Figure IV.43. Distribution de la déformation de Von mises d'un tube fissuré et réparé par soudure.

Après chaque opération de soudure les caractéristiques du matériau se partage en trois parties à savoir: matériau de soudure (MS), zone de transition (ZT) et matériau de base (MB). L'évolution de la contrainte de Von mises en fonction de la déformation (Figure IV.44) est bilinéaire. Dans la première phase MS, ZT et MB en pratiquement le même comportement et la différence réside seulement dans la deuxième phase où en note une pente plus importante pour MS suivie par ZT en enfin MB qui forme pratiquement un plateau.

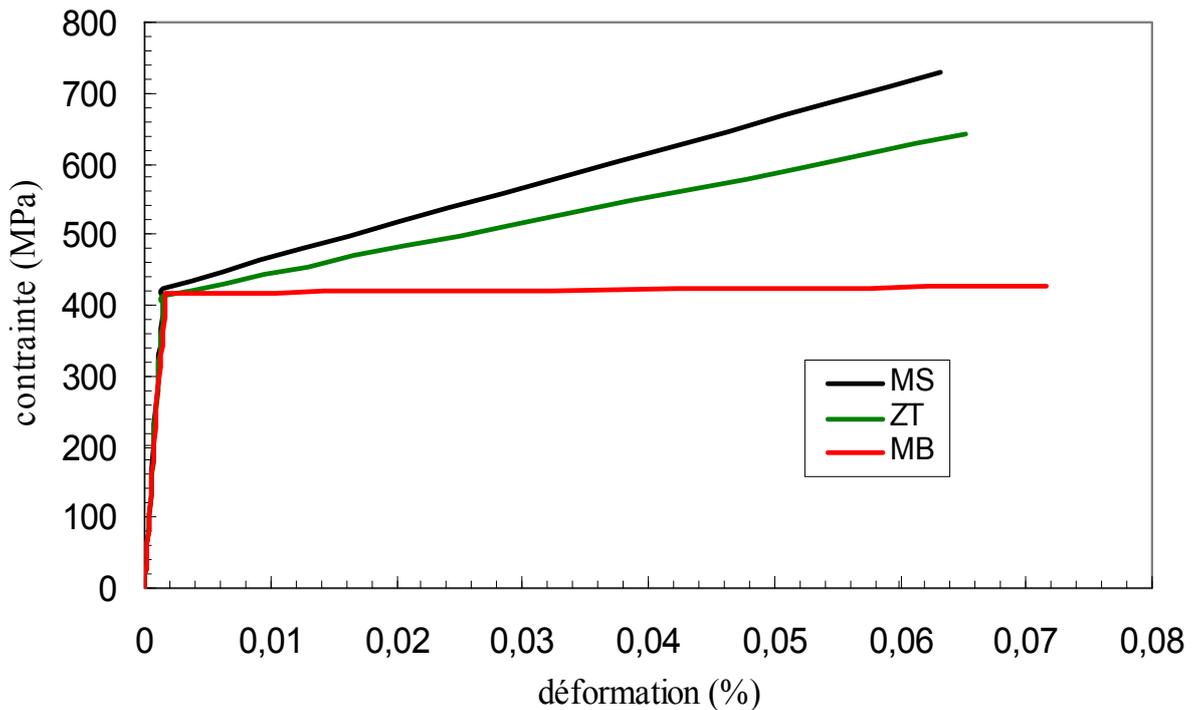


Figure IV.44. Contrainte déformation de Von mises d'un tube fissuré et réparé par soudure.

La figure IV.45 représente une récapitulation des différents cas d'étude de simulation en 3D d'un pipe sans défaut, fissuré sans réparation, réparé par matériau composite et par soudure. L'analyse des résultats obtenus montre bien que :

- la réparation par le matériau composite et par soudure sont pratiquement équivalentes et permettent d'avoir des contraintes maximales plus importantes (21% de plus) que le matériau de base ;
- la réparation rigidifie la zone réparée qui se traduit par une déformation plus faible que celle du matériau de base ;
- la présence de fissure dans un tube conduit à une chute de la contrainte maximale de 33 % comparativement à un tube sans défaut.

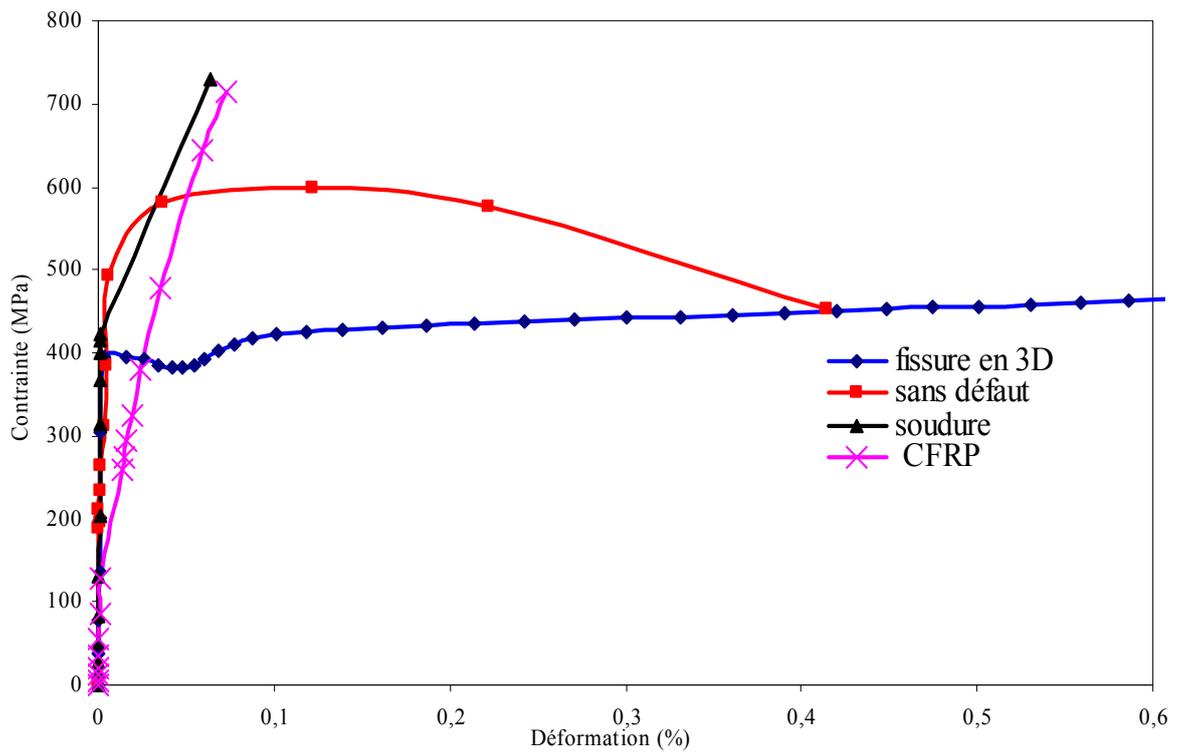
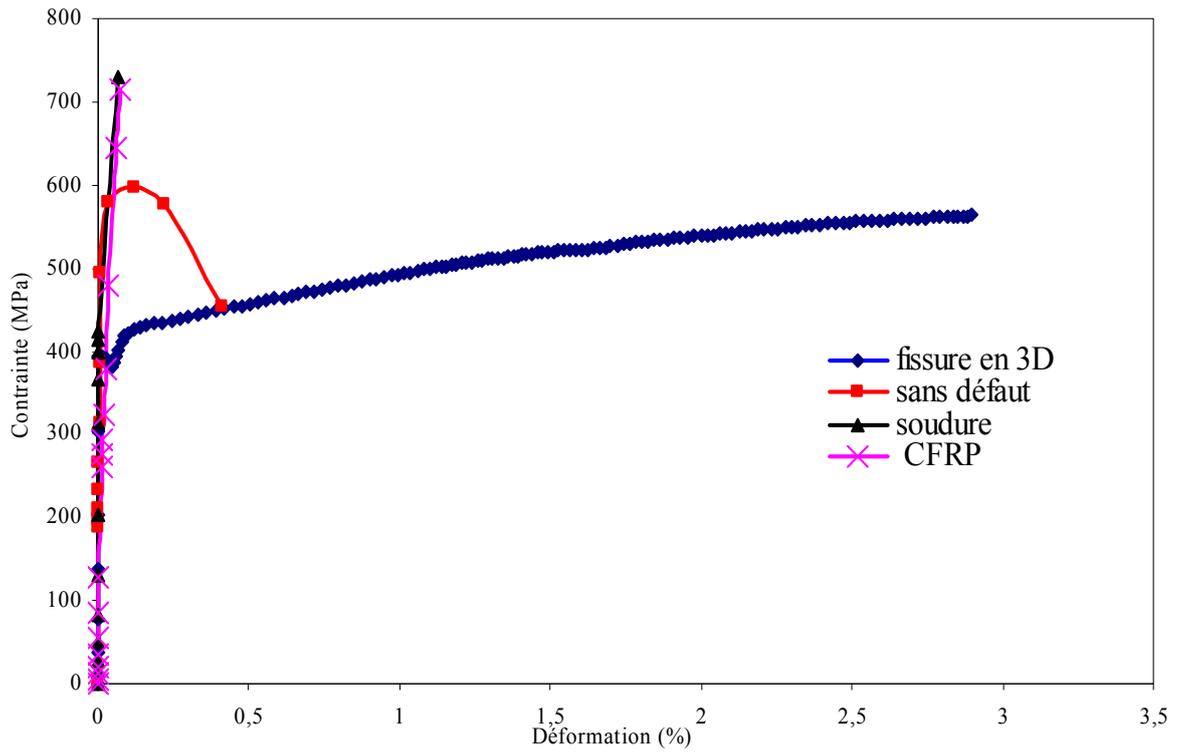


Figure IV.45 Contrainte-déformation de Von mises d'un pipe simulé en 3 D sans défaut, fissuré sans réparation, réparé par matériau composite et par soudure.

IV.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a examiné, dans un contexte d'analyse générale quelques aspects de simulation en 2D et 3D du comportement d'un tube sous chargement par une pression interne sans défaut et avec défauts de corrosion et de fissure. La simulation numérique a permis de mettre en évidence les caractéristiques phénoménologiques qui gouvernent le comportement du tube dans une canalisation. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les résultats de tube sans défaut et avec défaut réparer ; ceux obtenus par simulation numérique en ce qui concerne les contraintes et les déformations dans le domaine élastique et élasto-plastique.

La simulation numérique a montré son intérêt pour l'interprétation des résultats et la possibilité d'obtenir des informations difficilement accessibles par expérimentation. D'autre part, le modèle de matériau de type multilinéaire à écrouissage cinématique utilisé avec des éléments à huit ou six noeuds permet de suivre l'évolution des contraintes à travers l'épaisseur jusqu'à l'apparition de la zone plastifiée. Ces résultats promettent des perspectives d'exploitation des possibilités de la simulation numérique dans l'évaluation des charges ultimes sous la pression intérieure, les endommagements et leur réparation dans les pipelines.

Conclusion générale

Les endommagements impliquant des bosselures où même des fissures sont l'une des causes principales des défauts de canalisation de transmission en termes de chargement statique et cyclique de pression ou encore a cause de sévérité de l'environnement qui conduit à des défauts de corrosion. En raison de la sévérité de ces types de défaut, les compagnies d'exploitation de pipelines sont exigées pour répondre à ces anomalies par enlèvement des sections ou par la réparation. Anciennement les pipelines ont été réparés seulement par soudure, alors qu'à l'heure actuelle les canalisations peuvent être réparé par l'utilisation des matériaux composite en utilisant la méthode in-situ qui présente beaucoup d'avantages. Il y a un besoin croissant d'effectuer des réparations in-situ au pipeline de transport des hydrocarbures endommagées dues à une infrastructure corrodées ou fissurées. Quelques exemples de réparations par matériau composite ont été appliqués avec succès pour des pipelines de transport de pétrole et la technologie commence à être disponible pour ce type réparations.

Le travail présenté dans ce mémoire de Magister porte sur deux aspects, expérimentale et théorique de simulations.

Les essais expérimentaux de traction, pliage, Charpy, permettent de caractériser le matériau utilisé à savoir le X70. Les principales conclusions de l'étude expérimentale sont :

- la traction des échantillons sans soudure permet de caractériser le matériau de base alors que les éprouvettes soudées permettent de confirmer que la rupture s'effectue dans le matériau de base loin des zones soudées.
- le pliage confirme la non présence de fissures entre la soudure et le matériau de base
- les énergies de travail sont déterminées par les essais de Charpy.
- la dureté permet de révéler que le matériau de la zone soudé est plus dur que le matériau de base.
- les analyses chimiques confirment la conformité du matériau par rapport aux normes.

Les essais réels sur des pipelines coûtent très cher, à cet effet nous avons développé des modèles de simulations numériques en 2D et 3D du gonflement de tubes sans défaut et avec endommagement localisée par fissure ou corrosion réparé et non réparé par matériau composite et les principales conclusions sont :

- la possibilité d'obtenir des informations difficilement accessibles par expérimentation.

- le modèle de matériau de type multilinéaire à écrouissage cinématique utilisé avec des éléments à huit ou six noeuds permet de suivre l'évolution des contraintes à travers l'épaisseur jusqu'à l'apparition de la zone plastifiée.

- Les ruptures par des essais expérimentaux de la littérature sont en bonne concordance avec la localisation des contraintes ou déformations maximale obtenu par les modèles numérique développé sur le logiciel de calcul de structure ANSYS.

Référence :

1. Anne-Sophie BILAT [Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en aciers a haut grade :caracterisation et modelisation] Le 1^{er} juin 2007
2. Nessim and Mark J Stephens [Risk-based optimization of pipeline integrity maintenance] Maher A Centre for Frontier Engineering Research.
3. Algerie-carte TRC, [Challenger redoutable Pipe news Activité Transport par Canalisations] 2001
4. J.M. Wilson a, M.R. [Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system] J.M. Duell J.M. Duell a, Kessler, 4 August 2008
5. D. YAPP, S.A. BLACKMAN, [Recent Developments in High Productivity Pipeline Welding], J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng., Vol. XXVI, NO.1, pages 89, 2004.
6. Dr. J. Malcolm Gray [Niobium bearing steels in pipeline projects] Microalloying International, Inc. 10175 Harwin, Suite 110. Houston, Texas 77036, USA.
7. K. HULKA, HSLA [Large diameter pipe plate from standard production to X80/X100, Niobium Information], 1997
8. Gas pipeline incidents, 5th report of the european gas pipeline incident data group 2004
9. M. K. Gräf [High-strength Large-diameter Pipe for Long-distance High-pressure Gas Pipelines] Europipe GmbH, Mülheim, Germany. H.-G. Hillenbrand.Europipe GmbH, Ratingen, Germany. C. J. Heckmann and K. A. Niederhoff.
10. Thanh Trung LUU[Déchirure ductile des aciers a haute résistance pour gazoducs (X100)]. 24 novembre 2006
11. R.W. FONDA and G. SPANOS, [Microstructural Evolution in Ultra-Low-Carbon Steel Weldments], 2000
12. S.K. DHUA, D. MUKERJEE, AND D.S. SARMA, [Influence of Thermomechanical Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of HSLA100 Steel Plates]. 2003

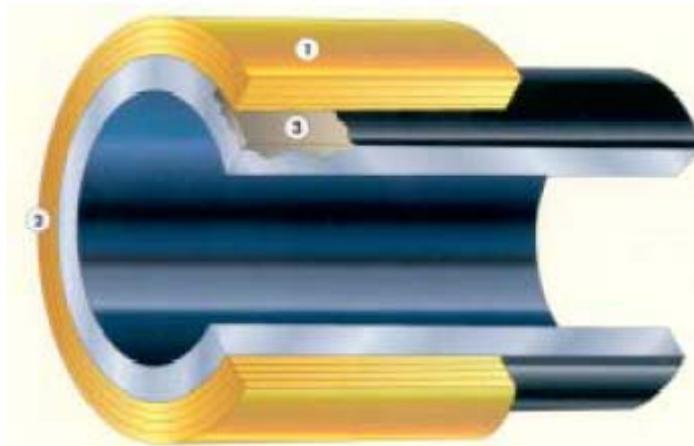
13. Dr. Hans-Georg Hillenbrand [Development of large-diameter pipe in grade X 100] Europipe GmbH, Ratingen, Germany. Dr. Andreas Liessem. Europipe Deutschland GmbH, Mülheim, Germany. Dr. Gerhard Knauf.H. G. Hillenbrand. Europipe EmbH, Ratingen, Germany.
14. Specification for line pipe API Specification 5L. FORTY-THIRD EDITION. March 2004. Effective Date October 4, 2004
15. J.N.H. TIRATSOO [Welding Metallurgy of Carbon and Alloy Steel British Steel Tubes and Pipes], Corby, Northants, UK.1995 G.E. LINERT, "", AWS, New-York, 1997.
16. M. BOUZIANE Abdelkader [contribution à la détermination des critères de qualité des tubes soudés soumis à une pression intérieure]. 2008
17. entreprise ALFA pipe ANNABA
18. R. BOUZID, E. BOUALI, M. GACEB [Analyse tendancielle et différentielle des interactions entre le procédé de soudage d'assemblage de gros tubes et son environnement] 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007
19. P. A. S. Reed 1 J. F. Knott 2. [investigation of the role of residual stresses in the warm prestress (wps) effect. part I-experimental] 1 Department of Engineering Materials, University of Southampton, U.K. 2 School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham, U.K. Received in final form 27 November 1995
20. [XIOO - fracture initiation and propagation] G. Mannucci-Centro Sviluppo Materiali S.p.A, Rome, Italy G. Demofonti — Centro Sviluppo Materiali S.p.A, Rome, Italy M. Di Biagio — Centro Sviluppo Materiali S.p.A, Rome, Italy.
21. [Temporary/permanent pipe repair – Guidelines.Prepared by AEA Technology Consulting for the Health and Safety Executive].OFFSHORE TECHNOLOGY REPORT 2001/038.
22. [MANUAL PIPELINE REPAIRS] DEP 31.40.60.12-Gen.December 1995.
23. United States Environmental Protection Agency Air and Radiation (6202J) 1200 Pennsylvania Ave., NW July 2003 Washington, DC 20460 EPA430-B-03-017.

24. Composite Pipeline Repairs - Clock Spring® is Different Patrick C. Porter 1, José Augusto Pereira da Silva². Copyright 2001, Brazilian Petroleum and Gas Institute – IBP
25. Internal Repair of Pipelines Semi-Annual Technical Progress Report Reporting. Period: September 30, 2002 through March 31, 2003. Principal Authors: Robin Gordon, Bill Bruce, Nancy Porter, Mike Sullivan, and Chris Neary
26. Guide de science mécanique et technologie industrielle. Nouvelle édition.
27. Calculation of strains in dents based on high resolution in-line caliper survey. 6th International Pipeline Conference September 25-29, 2006, Calgary, Alberta, Canada Stanislaw A. Lukasiewicz Chao Sun Jaorslaw A. Czyn Samer Adeeb
28. Analysis of composite sleeve reinforcement systems for metallic pipelines with localized imperfections or damage Heraldo Silva da Costa Mattos Eduardo Martins Sampaio Rodrigo Mendes Alves Cortes Mechanics of Solids in Brazil 2007.
29. Maddox, S.J., Assessing the significance of flaws in welds subjects to fatigue, 1974. Wel. 401-s.
30. Paris, P. & Sih, G., Fracture toughness testing and its application. *ASTM STP*, 381, p. 30, 1965.
31. ASME. Post construction standard, PCC-2, repair of pressure equipment and piping, article 4.1. Non-metallic composite repair systems for pipelines and pipework: high risk applications. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers; 2006.
32. Report prepared for Pipe Wrap Stress Engineering Services, Inc. LLC SES PN113647CRA October 2006 Chris Alexander Daniel A. Pitts, P. E.
33. ASSESSING THE USE OF COMPOSITE MATERIALS IN RE-RATING LIQUID AND GAS TRANSMISSION PIPELINES Christopher R. Alexander Fred D. Wilson
34. EVALUATION OF PIPELINE DESIGN FACTORS August 1999 – January 2000 Evangelos Michalopoulos and Sandy Babka
35. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials Designation: D 3039/D 3039M December 2002
36. PCC-2, REPAIR STANDARD. ARTICLE 4.2, NON-METALLIC COMPOSITE REPAIR SYSTEMS FOR PIPELINES AND PIPEWORK: LOW RISK APPLICATIONS. 27 October 2005. *ASME Post Construction SC-Repair & Testing*
37. American Society of Mechanical Engineers, Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines, ASME B31G-1991, New York, New York, 1991 edition.

- 38 Designation: A 370 – 01 An American National Standard Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products1
- 39 Mechanical Metallurgy, G.E. Dieter, chap. 9, The Tension Test, p. 329-377, Internatl. Student Edition McGraw-Hill, 1976.
- 40 Société Instron – les duretés Rockwell, Vickers et Brinell
- 41 Métallerie 95, Novembre 2006 [Examen de la flexibilité et de la résistance des matériaux] Version originale: Gene Mathers. Adaptation: Leo Vermeulen. Traduction en français: Marie-Christine Ritzen.
- 42 Nui L.S, Chehimi C, Pluvinage G, Stress field near a large blunted V notch and application of the concept of critical notch stress intensity factor to the fracture of very brittle materials. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 49, N°3, p 325-335, (1994)
- 43 Modélisation de l'essai Charpy : application à la transition ductile–fragile d'un acier bainitique 16MND5 B. Tanguy, J. Besson, A. Pineau Centre des Matériaux, École des Mines de Paris, UMR CNRS 7633, BP 87 Evry cedex 91003
- 44 Release 11.0 Documentation for ANSYS
- 45 Mannucci, G. and Demofonti, G. (2001). Fracture properties of API X100 gas pipeline steels. In : 13th Joint Meeting PRCI-EPRG, New Orleans.
- 46 Chris Alexander [SES BURST TEST PROCEDURE OF REPAIRED PIPE].Project Number: PN113647, Project Manager: Testing Date: Tuesday, April 25, 2006 Testing Description: Pressurize repaired pipe (12.75-in x 0.188-in, Grade X52 pipe with 50% corrosion)

Annexe 01

Exemple de réparation par matériau composite (Clock Spring)



Système Clock Springer

Le système de Clock Spring se compose de:

1. Breveté, haute résistance, structure composite unidirectionnelle.
2. Un traitement breveté et rapide, système adhésif en deux parties à rendement élevé.
3. Une résistance à la pression extrêmement élevée, composant de propriété industrielle de transfert de charge.



Localiser l'anomalie

Le secteur général de l'anomalie (endommagés) est excavé au voisinage de la distance d'un point de référence tel qu'une valve ou le nombre de périmètre soudé du point de lancement d'outil d'inspection.



Excavation

La canalisation est exposée, l'anomalie est localisée et une évaluation préliminaire effectuée.



Mise en évidence de l'anomalie

Des mesures exactes sont prises d'un point de référence telle qu'une soudure de périmètre. La taille et l'orientation préliminaires de l'anomalie sont documentées.



Documentation de l'état de canalisation

Toute l'information est documentée avant le déplacement de l'enveloppe ou de l'enduit.



Déplacement d'enduit

L'enveloppe protectrice ou l'enduit de la canalisation est enlevée en vue du soufflage de sable.



Sablage

La canalisation est sablée à un état nu propre en métal.



Préparation de la canalisation pour l'évaluation

La canalisation sablée est préparée pour une évaluation détaillée de l'anomalie



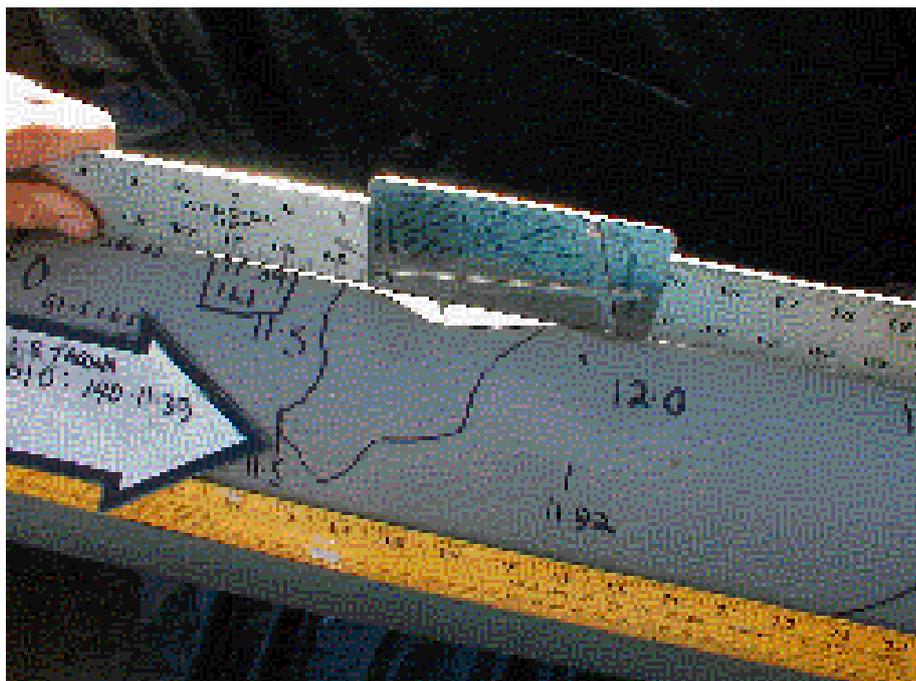
Mesure de défaut

L'anomalie est mesurée, documentée et examinée pour toutes les fissures, cannelures ou d'autres imperfections qui pourraient affecter la force de la canalisation.



Évaluation de défaut.

Des mesures précises sont prises de la taille de l'anomalie. Le secteur endommagé est également examiné pour toutes les fissures extérieures ou toute autre force réduisant les endommages. Le secteur est photographié.



Mesure de profondeur.

La profondeur des endommagements est mesurée et enregistrée. Le secteur endommagé est également photographié dans toute l'évaluation. Les endommagements sont évalués par l'industrie qui ont identifié des critères pour déterminer si les endommagements peuvent être réparés ou doivent être coupés.



Essai ultrasonique d'épaisseur.

Des mesures ultrasoniques d'épaisseur de paroi sont prises pour évaluer n'importe quelle perte apparente de paroi. Les endommagements sont évalués par l'industrie qui ont

identifié des critères pour déterminer si les endommagements peuvent être réparés ou doivent être coupés.



Ressuage de flux magnétique.

Puisque beaucoup de fissures extérieures ne sont pas évidentes à l'oeil nu une évaluation de flux magnétique est effectuée pour déterminer l'ampleur de toutes les fissures ou de toute autre force réduisant des imperfections dans la canalisation.



Rectification superficielle.

Le secteur endommagé est rectifié lisse pour enlever n'importe quelles gouges ou force réduisant les fissures extérieures.



Documentation et évaluation finales.

L'anomalie est encore évaluée avant l'installation de la douille de réparation de Clock Spring.



Essais ultrasoniques d'épaisseur de paroi.

Des mesures ultrasoniques d'épaisseur de paroi sont de nouveau prises après le meulage à l'épaisseur d'autre paroi réelle de mesure avant l'installation du Clock Spring.



Examiner l'inscription d'ajustement et d'endroit.

Le Clock Spring est un essai adapté et l'endroit est marqué sur la canalisation pour s'assurer que la douille de réparation est concentrée sur les endommagements réels sur la canalisation.



Préparation à l'installation de Clock Spring.

Une bande bi-directionnelle est placée sur la canalisation pour guider la Clock Spring dans sa place tandis qu'elle est enroulée autour de la canalisation.



Matériau de remplissage.

Un matériau de remplissage est mélangé en préparation pour plomber l'anomalie sur la canalisation.



Remplir anomalie.

Le matériau de remplissage est réparti sur le secteur endommagé de la canalisation et autour de la bande bi-directionnelle. La bande a une couche externe protectrice qui sert à

la surveillance du remplissage et a assuré l'adhérence et sera enlevée avant le début de l'installation de Clock Spring.



Préparation de la résine.

Un mélange de la résine époxyde est préparé. La résine est employée pour adhérer le Clock Spring à la canalisation et pour adhérer entre les différentes couches du Clock Spring.



Installation de résine.

La résine est répandue autour de la circonférence entière de la canalisation.



Installation de Clock Spring.

La Clock Spring est adhérent à la bande bi-directionnelle et est enroulé circonférentiellement autour de la canalisation.



Installation de Clock Spring.

La résine est répandue entre chaque couche pendant que la Clock Spring est enroulé autour de la canalisation.



Serrage de Clock Spring.

Une courroie de serrage est placée autour de la circonférence du Clock Spring et serré jusqu'à que toutes les résines et remplisseur excessif est serré hors de la douille.



Installation finale.

Le cerclage de la bande est placé autour du Clock Spring pour la tenir pendant sont durcissement qui est effectuer approximativement après 2 heures.



L'amorce et enveloppent.

La canalisation amorcée et une enveloppe ou un enduit protecteur sera alors réappliqué. Des courroies en acier seront enroulées autour du Clock spring avant que le revêtement de protection final ne soit appliqué.