

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique
Mémoire de Fin d'Etudes
en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Mécanique
Option : Fabrication Mécanique et Productique

Intitulé de mémoire

**PREDICTION DE LA PRESSION DE RUPTURE DES
CANALISATIONS CORRODEES PAR LA METHODE DES
ELEMENTS FINIS**

Réalisé par :
BENKOUTEN IMENE
CHABLI OUERDIA

Promoteurs :
Dr. BOUTOUTAOU HAMID
Dr. BOULEDROUA OMAR

Promotion 2021/2022

Remerciement

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre gratitude.

Nous tenons tout particulièrement à remercier monsieur BOULEDDROUA Omar pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous désirons remercier le professeur de l'université de Boumerdes, monsieur BOUTOUTAOU Hamid qui nous a fourni les outils nécessaire et qui a guidé nos réflexions durant notre recherche.

Nous aimerions exprimer notre gratitude à tous les chercheurs et spécialistes, trop nombreux pour les citer, qui ont pris le temps de discuter de notre sujet. Chacun de ces échanges nous a aidés à faire avancer notre analyse.

Un merci à tous les professeurs de l'Université M'Hamed Bougara de Boumerdes qui nous ont fait grandir durant ce parcours universitaire.

Enfin, que toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail soient chaleureusement remerciés.

Dédicace

Je tiens à remercier dieu de m'avoir donné la force et le courage pour arriver à finir ce travail.

Remercier ma très chère maman Assia qui a toujours répondu présente quand j'avais besoin et qui a fait de moi la femme que je suis aujourd'hui.

A mes tendres sœurs Faïza et Nassima pour leur soutien et encouragement.

A mes beaux-frères Toufik et Mounir qui ont été plus que des frères pour moi pour leur bienveillance.

A mes amis (es) pour leurs bons conseils et belles paroles.

A mon binôme Ouerdia pour l'effort et l'aide pour réaliser ce travail.

Je tiens à rendre hommage à mon défunt père qui est parti trop tôt que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.

BENKOUITEN IMENE

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, mon précieux offre de Dieu, à qui je dois ma vie, ma réussite, et tous mon respect mon cher père Ali.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargner aucun effort pour me rendre heureuse mon adorable mère Rbiha.

A mon mari Houceïne qui m'a encouragé pour continuer mes études et pour sa patience et sa compréhension

A mon grand frère Mohammed et sa femme Hafidha

A mes chers frères Farid et Karim.

A mes chères sœur Ouiza, Fatima, Nora, Sobhia, Nadia, et la petite Saïda

A mes adorable enfants OKBA Ali et Zaid Anes

A ma belle-mère et ma belle famille

Mes neveux et nièces

Mes amies Amel et Habiba

Sans oublier mon binôme Imene pour sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

CHABLI Ouerdia

Sommaire

Introduction générale	2
Chapitre I : Problématique et méthodologie	
I.1.Introduction	5
I.2.Problème rencontré	8
I.3.Méthodologie	12
Chapitre II : Généralités des transports hydrocarbure	
II.1.Introduction	15
II.2.Cause de défaillance du pipeline	16
II.3.Inspection et contrôle de la corrosion des pipelines	18
II.4. Intégrité management des canalisations	18
II.4.1 Méthodes de réparation	19
II.4.1.1Retrait et remplacement d'un tronçon défectueux	19
II.4.1.2.Manchons de type A (renforcement)	20
II.4.1.3.Manchons de type B	21
II.4.1.4.Système de réparation par manchon composite	21
II.4.1.5 Rechargement à chaud	22
II.4.1.5.1 Limitation sur l'utilisation de la réparation par rechargement à chaud	23
II.4.1.6 Collier de serrage	23
II.4.1.6.1 Deux pinces boulonnées (Bolt-On Clamps)	23
II.4.1.6.2 Collier de fuite (Leak Clamps)	24
II.4.1.7 Piquage en charge	24
II.4.2. Calcule de la pression limite	25
Chapitre III : Les codes de calcul de pression limite	
III.1.Introduction	27
III.2.Modèle de Barlow	27
III.3.ASME B31G et ASME B31G modifié	29
III.4.DNV RP-F101	31
III.5.Shell92	32
III.6.P-CORRC	32
III.7.CSA Z662	33
III.8.NETTO	33
Chapitre IV : Résultats et discussions	
IV.1.Introduction	36
IV.2.Etude statistique de la base de données	37
IV.3.Interprétation	40
IV.4.Etude numérique (MEF)	41
IV.4.1. Simulation numérique des tests d'éclatements de Netto	41
IV.4.1.1 Etude de l'éprouvette T2D	43
IV.4.1.2 Etude de l'éprouvette T7D	47
IV.4.2. Simulation numérique du test d'éclatement de Benjamin	50
IV.4.2.1 Test expérimental d'éclatement	50
IV.4.2.2 Simulation numérique	51
Conclusion et perspectives	56
Annexe A	59

Listes des figures

Introduction générale

Figure.1 : Variation du prix du pétrole depuis décembre 2021 jusqu'à aujourd'hui. 3

Chapitre I : Problématique et méthodologie

- Figures I.1 : Explosion d'un gazoduc dans la région de Mohammadia-Algérie. 5
- Figure.I.2 : Le pipeline GPL a été exposé pour transporter le gaz de pétrole liquéfié de HASSI R'mel à Arzew. 6
- Figure.I.3 : Fuite de condensat sur le NZ1 28 (ville de RELIZANE EL MATMAR ,2011), mis en service en 1978, (a) Concentration de GPL, (b) Point de fuite, (c) Réparation de la fuite par un clamp. 6
- Figure.I.4 : Explosion du service d'exploitation sur la région de Hassi Messaoud. 7
- Figure I.5 : Racleur instrumenté (RTO CC5 KENANDA, 2016). 7
- Figure I.6 : L'ensemble des indications dans un fichier d'inspection des canalisations. 8
- Figure I.7 : Localisation des défauts critiques dans le pipeline utilisé 10
- Figure I.8 : Taille et localisation des défauts en fonction de la distance longitudinale de la canalisation, (a) orientation à gauche et (b) rapport de profondeur des défauts, (b) profondeur des défauts 11
- Figure I.9 : Exemple de vue schématique du défaut N°1 dans la canalisation 11
- Figure I.10 : Présentation du défaut N°1 avant l'essai d'éclatement. 12
- Figure I.11 : Résistance de l'ensemble du nid de corrosion (a) et état du gommage (b) à 90 bars de pression. 12

Chapitre II : Généralité sur le transport d'hydrocarbure par canalisation

- Figure II.1 : Cartographie actuelle du Réseau de Transport. 16
- Figure II.2 : Exemples de corrosions généralisées dans les pipelines, (a) Corrosion interne (TRC, 2013), (b) Corrosion externe (Sonatrach- HASSI R'mel, 2015) (c) Croquis sur la longueur, la largeur et la profondeur irrégulières d'un défaut de corrosion typique. 17
- Figure II.3 : (a) Exemples de défaillances de pipelines dues à des corrosions externes (TRC, 2016), (b) Esquisse sur la longueur, la largeur et la profondeur irrégulières d'un défaut de corrosion typique (TRC, 2011). 17
- Figure.II.4 : Distribution des défauts à l'intérieur et à l'extérieur du pipeline. 18
- Figure II.5 : Procédure de détermination de l'ERF pour divers défaut. 19
- Figure II.6 : Schéma d'un manchon de type A. 20
- Figure II.7 : Installation d'un manchon de réparation de type B. 21
- Figure II.8 : Méthode de réparation par manchon composite (RTO, 2013). (a) Défaut détecté, (b) Préparation de la surface, (c) Réparations localisées sur un tuyau en acier corrodé. 22
- Figure II.9 : Réparation de l'état final de la manche (TRC, 2016). 22
- Figures II.10 : (a) Défaut interne avec remplissage externe, (b) Défaut externe avec remplissage externe. 23
- Figure II.11 : Installation du collier de serrage boulonné. 24
- Figure II.12 : Type de collier de fuite. 24
- Figure II.13 : Processus d'installation du piquage en charge. 25

Chapitre III : Les codes de calcul de pression limite	
Figure III.1 : Diagramme libre d'une canalisation pressurisée.	28
Figure III.2 : (a) Illustration typique de défauts de corrosion (axe longitudinal). (b) Défaut de corrosion court simplifié comme une courbe parabolique (ASME B31G). (c) Défauts de corrosion longs simplifiés comme un défaut rectangulaire.	29
Figure III.3 : Éprouvette après éclatement.	34
Chapitre IV : Résultat et discussion	
Figure IV.1 : Schéma présentatif de la méthodologie utilisé pour l'évaluation des méthodes de calcul de la pression limite.	38
Figure IV.2 : Variation du rapport de pression calculée par les différentes méthodes.	38
Figure IV.3 : Variation des paramètres statistiques pour chaque méthode de calcul. (a) Nombres de points dans la zone de sécurité, (b) Erreur globale, (c) Erreur dans la zone d'éclatement, (d) Erreur dans la zone de sécurité.	39
Figure IV.4 : Vue schématique des spécimens d'essai	42
Figure IV.5 : (a) Éprouvette avec un défaut induit. (b)Spécimens d'essai après l'éclatement	42
Figure.IV.6 : Courbe conventionnelle donnée par le test de traction	43
Figure IV.7 : Représentation de la géométrie de l'éprouvette T2D.	44
Figure IV.8 : Représentation du maillage du défaut elliptique de T2D.	44
Figure IV.9 : Evolution et la répartition des contraintes à la rupture dans le tronçon lors de l'analyse numérique par éléments finis pour l'éprouvette T2D.	45
Figure IV.10 : Contours de la contrainte de Von Mises.	46
Figure IV.11 : Evolution de la contrainte en fonction de la pression limite.	46
Figure IV.12 : Evolution et la répartition des contraintes à la rupture dans le tronçon lors de l'analyse numérique par éléments finis pour l'éprouvette T7D.	47
Figure IV.13 : Contours de la contrainte de Von Mises pour l'éprouvette T4D.	47
Figure IV.14 : Evolution de la contrainte en fonction de la pression limite	48
Figure IV.15 : Variation du rapport de pression calculée par les méthodes standards et la méthode des éléments finis.	50
Figure IV.16 Défaut après test d'éclatement.	50
Figure IV.17 : Représentation de la géométrie et du maillage du tronçon, (a). le maillage complet du tronçon, (b) représentation du maillage du défaut rectangulaire.	51
Figure IV.18 : Evolution et la répartition des contraintes à la rupture dans le tronçon lors de l'analyse numérique par éléments finis, (a) la contrainte obtenue suite à 5 Mpa, (b) la contrainte obtenue suite à 12 Mpa.	51
Figure IV.19 : Variation du rapport de pression calculée par les méthodes standards et la méthode des éléments finis.	54

Liste des tableaux

Chapitre I : Problématique et méthodologie

Tableau I.1 : Information générale du pipeline	9
Table I.2 : Dimension, position et pression limite des défauts de tuyauterie calculés par la B31G et la B31G modifiée	10

Chapitre IV : Résultat et discussion

Tableau IV.1 : Résultats statistique de la fiabilité des méthodes de calcul de la pression limite.	39
--	----

Tableau IV.2 : Propriétés géométriques et pressions d'éclatement des tubes testés.	42
Tableau IV.3 : Comparaison entre les méthodes de calcul de la pression limite des codes standards avec la méthode des éléments finis.	49
Tableau IV.4 : Comparaison entre les méthodes de calcul de la pression limite des codes standards avec la méthode des éléments finis pour le test de X60.	53

المخلص : نظرا لتزايد الطلب العالمي على الغاز فان الجزائر تعمل على رفع منتوجية هذا الأخير وذلك برفع تدفق الامدادات الذي ينعكس بدوره على الضغط الداخلي الذي ينتج عنه خطر على سلامة خط الأنابيب لاسيما مع وجود عيوب التآكل.

تستخدم سوناطراك 24 ألف كيلومتر من خطوط الأنابيب لنقل الغاز والنفط. بمرور الوقت تتعرض هذه الأنابيب لخطر الانفجار بسبب التآكل داخل و / أو خارج خط الأنابيب. لهذا، يجب إجراء فحص باستخدام مكشطة مجهزة. توفر هذه الأداة الذكية فكرة مفصلة عن جميع الأخطاء في خط الأنابيب. بناءً على قيم ERF ، يتم تقسيم عيوب التآكل هذه إلى قسمين: عيب مقبول وغير مقبول. بالنسبة للعيوب المقبولة ($ERF < 1$)، من الضروري حساب قيمة جديدة للضغط لضمان سلامة خط الأنابيب المتآكل، مع الحفاظ على الاستمرارية والإنتاج. في هذا الصدد، تستخدم سوناطراك رمزي حساب الضغط المحدود، مثل: (ASME B31G 2009) و (ASME B31Gmod 2012) الهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة مقارنة لمختلف طرق حساب الضغط الحدي الموجودة في الأدبيات (DNV RP F-101، SHELL، P-CORRC، NETTO، CSA Z662). سيتم إجراء هذه المقارنة باستخدام قاعدة بيانات تتضمن 329 اختبار انفجار تم نشره في الأدبيات. أخيرًا سنقترح نهجًا جديدًا يعتمد على طريقة العناصر المحدودة باستخدام البرنامج التجاري ANSYS

Résumé : En raison de l'augmentation de la demande mondiale de gaz, l'Algérie s'emploie à augmenter la productivité de ce dernier en augmentant le flux d'approvisionnement, ce qui se traduit à son tour par la pression interne, ce qui entraîne un danger pour l'intégrité du gazoduc, en particulier avec la présence de défauts de corrosion. Sonatrach utilise 24 000 kilomètres de canalisations pour transporter le gaz et le pétrole. Au fil du temps, ces tuyaux courent le risque d'éclater en raison de la corrosion à l'intérieur et/ou à l'extérieur de la canalisation. Pour cela, un contrôle doit être effectué à l'aide d'un racleur équipé. Cet outil intelligent fournit une idée détaillée de toutes les erreurs dans le pipeline. Sur la base des valeurs ERF, ces défauts d'usure sont divisés en deux parties : défaut acceptable et défaut inacceptable. Pour les défauts acceptables ($ERF < 1$), il est nécessaire de calculer une nouvelle valeur de pression pour assurer l'intégrité de la canalisation corrodée, tout en maintenant la continuité et la production. A cet égard, Sonatrach utilise un calcul symbolique de pression finie, tel que : ASME B31G 2009 et ASME B31Gmod 2012.

L'objectif de ce travail est de réaliser une étude comparative des différentes méthodes de calcul de la pression marginale trouvées dans la littérature (DNV RP F-101, SHELL, P-CORRC, NETTO et CSA Z662). Cette comparaison sera faite à partir d'une base de données de 329 de tests d'éclatements publiés dans la littérature. Enfin nous proposerons une nouvelle approche basée sur la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel commercial ANSYS.

Abstract : Due to the increase in global demand for gas, Algeria is working to increase the productivity of the latter by increasing the flow of supply, which in turn results in internal pressure, which leads to a danger to the integrity of the pipeline, especially with the presence of corrosion defects. Sonatrach uses 24,000 kilometers of pipelines to transport gas and oil. Over time, these pipes run the risk of bursting due to corrosion inside and/or outside the pipeline. For this reason, a check must be made with the help of an equipped scraper. This intelligent tool provides a detailed picture of all errors in the pipeline. Based on the ERF values, these wear defects are divided into two parts: acceptable defect and unacceptable defect. For acceptable defects ($ERF < 1$), it is necessary to calculate a new pressure value to ensure the integrity of the corroded pipeline, while maintaining continuity and production. In this regard, Sonatrach uses a symbolic calculation of finite pressure, such as: ASME B31G 2009 and ASME B31Gmod 2012.

The objective of this work is to conduct a comparative study of the different methods of calculating the marginal pressure found in the literature (DNV RP F-101, SHELL, P-CORRC, NETTO and CSA Z662). This comparison will be made from a database of 329 burst tests published in the literature. Finally we will propose a new approach based on the finite element method using the commercial software ANSYS.

Introduction Générale



Introduction Générale

Depuis de nombreuses années, l'hydrocarbure est considéré comme une substance première très importante jouant un rôle primordial dans l'industrie. Le pétrole est sans doute l'une des ressources les plus convoitées au monde au point d'être souvent le nerf de guerre. C'est lui qui a permis l'émergence des économies industrielles au XX^e siècle grâce à sa propriété de contenir beaucoup d'énergie dans un petit volume facilement transportable. Le pétrole est un produit de base dont le prix est déterminé en fonction de l'offre et de la demande. L'offre provient des compagnies qui extraient le pétrole. La demande émane, quant à elle, des raffineurs qui transforment le pétrole brut en produits utilisables par les clients finaux (carburants, combustibles, matière première pour l'industrie pétrochimique). Le pétrole a pris une place considérable dans la civilisation, non seulement parce qu'il est un producteur d'énergie qui avec le gaz naturel fournit les 60 % des besoins énergétiques mondiaux [29].

Les échanges internationaux en matières gaz-pétrole, que ce soit brut ou produit finis, sont régis par des contrats ou des réglementations de vente répandant à des spécifications assurant le transport, l'exploitation et l'utilisation des produits finis. En effet, ces spécifications offrent à l'utilisateur une garantie de qualité [31].

L'Algérie, le plus grand pays d'Afrique, est l'un des trois plus remarquables producteurs d'hydrocarbures de ce continent. Elle occupe une place importante sur le marché mondial de l'énergie en raison de plusieurs facteurs. Elle possède les huitièmes plus grandes réserves de gaz naturel au monde. En termes de production, 75% de sa production d'hydrocarbures provient des champs de Hassi Messaoud et de Hassi R'Mel. Pour l'Algérie, le secteur des hydrocarbures est un domaine crucial, car il représente la partie essentielle de ses revenus [32].

Aujourd'hui le marché mondial de l'hydrocarbure passe par une crise suite aux derniers événements (guerre russo-ukrainienne), ce qui a déstabilisé le marché du pétrole et du gaz, par ailleurs il a été favorable pour l'Algérie. Après son classement en 4^{ème} position après Nigéria, Lybie et Angola en 2021, Voilà qu'aujourd'hui, l'Algérie augmente sa production à 1.2 million de barils par jour. Durant cette année, Sonatrach a réalisé trois nouvelles découvertes de gisements pétroliers. Parmi ces trois nouvelles découvertes, on enregistre une importante trouvaille concrétisée au niveau du périmètre de la région de Touggourt. Il s'agit d'un gisement estimé à hauteur d'un milliard de barils. Le groupe Sonatrach comptait investir 40 milliards de dollars entre 2022 et 2026 dans l'exploration, la prospection et la production [28].

Depuis décembre 2021 le prix du baril a connu une grande variation d'amplitude, de 66 dollar le baril à 115 dollar aujourd'hui (Figure.1) [43]. De plus le 2 juin 2022, l'Opep+ décide d'augmenter la production pétrolière de l'Algérie à 104 000 barils/jour. Cette décision correspond à une augmentation de la production de 17 000 barils/jour.



Figure.1 : Variation du prix du pétrole depuis décembre 2021 jusqu'à aujourd'hui.

A ce propos, ce travail rentre dans le cadre du développement technique qui permet l'augmentation de la production qui concerne l'activité de transport par canalisation (TRC) de la SONATRACH.

Nous allons comparer les méthodes de calculs de la pression limite afin d'aider le manager à prendre une décision sur le choix de calcul le plus fiable par rapport au compromis production et sécurité afin d'augmenter encore plus la production tout en prenant compte de la sécurité.

Chapitre I :

Problématique et méthodologie



Chapitre I : Problématique et méthodologie

I.1. Introduction

L'exploitation d'un pipeline sans accident est le rêve de tous les responsables de l'industrie pétrolière et gazière, mais la corrosion, par nature, est un problème difficile à résoudre. La corrosion existe depuis toujours et provoque la dégradation des propriétés mécaniques du système de pipeline en raison d'une réaction chimique avec le fluide opérationnel et son environnement. Par conséquent, les sociétés de pipelines ont besoin de déterminer les dimensions critiques des défauts afin de prendre des décisions concernant la réparation des défauts ou leur maintien en service [32].

La corrosion n'est malheureusement pas le seul problème que rencontre le pipeline. Les risques naturels, tels que les tremblements de terre, les inondations et les glissements de terrain, peuvent être à l'origine d'accidents dans les réseaux de pipelines, avec des conséquences potentiellement néfastes pour la population, l'environnement et l'économie, y compris les principales chaînes d'approvisionnement. De nombreux accidents graves témoignent du risque associé aux systèmes de pipelines.

Le 19 octobre 2006 à 7h10, la rupture d'un important gazoduc souterrain à haute pression à Mohammadia, en Algérie, a fait 78 blessés. Selon les médias locaux, l'incendie s'est propagé dans un rayon de 210 m, entraînant une pollution de l'air, cet incident a causé des dommages aux habitations voisines ainsi qu'aux personnes qui y vivent [32].



Figures I.1 : Explosion d'un gazoduc dans la région de Mohammadia-Algérie.

Le gazoduc était enterré et transportait du gaz à 51 bars avec un débit de 1450000 m³/h de Hassi R'mel à Arzew. Les photos aériennes de la scène ont montré des tuyaux cisailés après l'explosion, ainsi qu'une tranchée et un cratère, ce qui suggère qu'il y a eu une importante libération de gaz avant que l'explosion ne se produise.

Suite aux fortes pluies du vendredi 11.09.2009 dans la région de Laghouat, un fort courant s'est créé à Oued M'zi, où un pipeline GPL aérien a été mis à nu pour transporter du gaz de pétrole liquéfié de HASSI R'mel à Arzew, sous une pression de 25 bars, puis ce pipeline s'est cisailé en deux points, ce qui a entraîné le 12 septembre 2009 à 00h10 une forte explosion accompagnée d'un incendie et de flammes jusqu'à 50 m de hauteur [32].

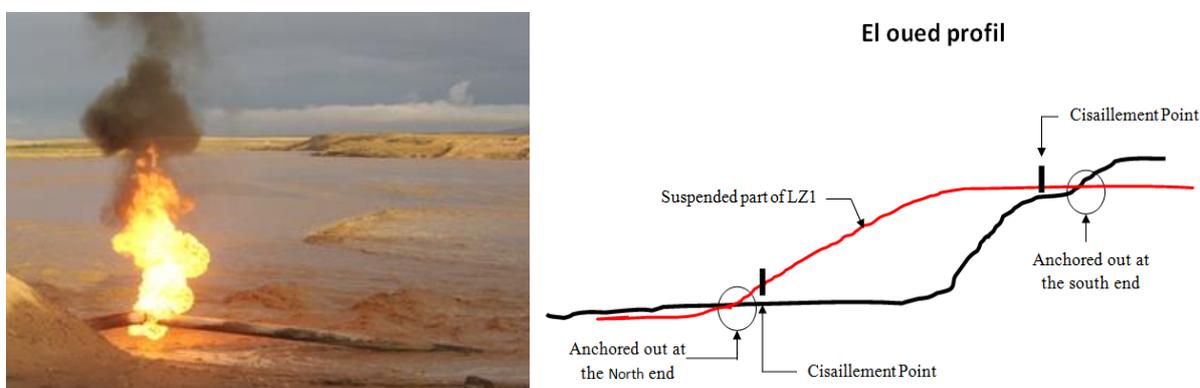


Figure.I.2 : Le pipeline GPL a été exposé pour transporter le gaz de pétrole liquéfié de HASSI R'mel à Arzew.

Un autre accident dû à la corrosion est apparu en Algérie le 09 mai 2011, vers 14h00, une flaque d'huile est apparue près de la ligne du pipeline de GPL dans la région d'El Matmar-Relizane.

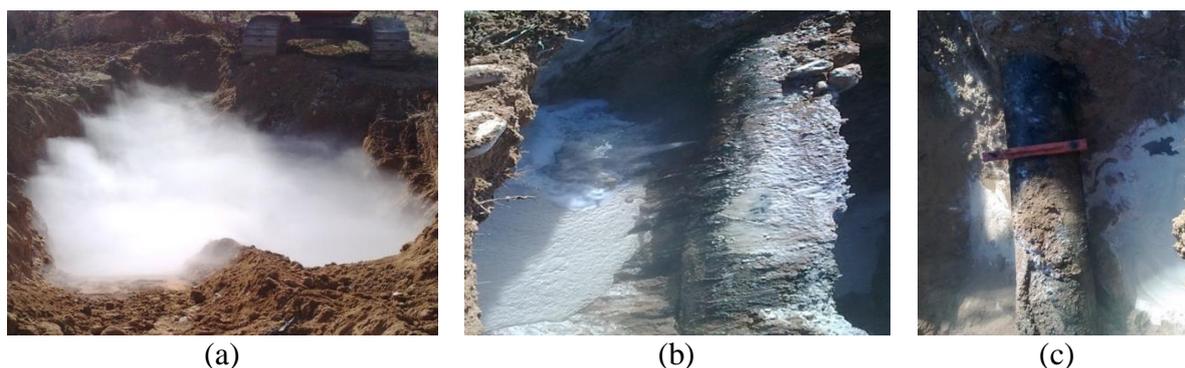


Figure.I.3 : Fuite de condensat sur le NZ1 28 (ville de RELIZANE EL MATMAR ,2011), mis en service en 1978, (a) Concentration de GPL, (b) Point de fuite, (c) Réparation de la fuite par un clamp.

Cet oléoduc a été arrêté au moment de l'incident à cause d'une fuite due à la corrosion à 05h00 du matin où la perforation a atteint 0.5cm de diamètre et la pression à ce point était de 5 bars.

Le dernier accident, le vendredi 11/08/2017 d'oléoduc dans la région de Hassi Messaoud. Il s'agissait d'une forte explosion accompagnée d'un incendie et de flammes de grandes feuilles d'exploitation du service [32].



Figure.I.4 : Explosion du service d'exploitation sur la région de Hassi Messaoud.

Selon le règlement intérieur, la surveillance et l'inspection des canalisations de transport d'hydrocarbure doit être inspecté périodiquement chaque 10 ans au minimum en utilisant le racleur instrumenté.

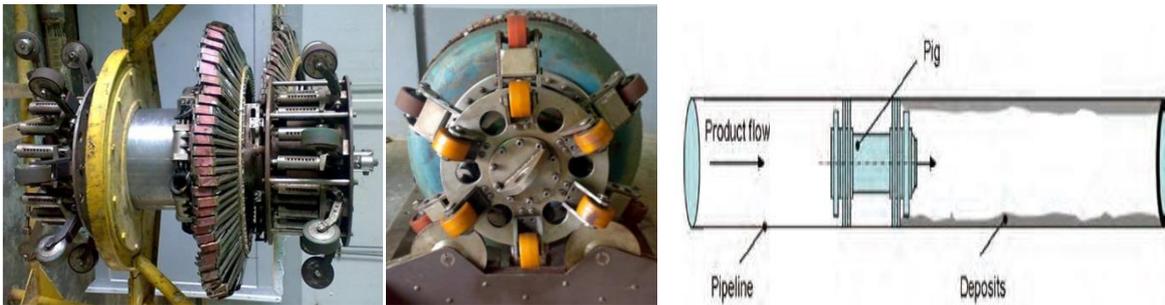


Figure I.5 : Racleur instrumenté (RTO CC5 KENANDA, 2016).

La figure I.6 représente un exemple de fichier d'inspection de différentes indications. Le critère d'évaluation utilisé pour les défauts de corrosion interne ou externe est l'ERF (estimated repair factor). Les défauts ayant un $ERF > 1$ doivent être réparés, par contre les défauts ayant un $ERF < 1$ nécessitent une étude de l'intégrité de la canalisation corrodée, dans ce cas on est obligé de calculer une nouvelle pression de service. Généralement au niveau de SONATRACH, l'activité de transport par canalisations (TRC), la direction pipeline integrity management (PIM) utilise les deux codes de calcul de la pression limite ASME B31G (2009) et ASME B31G_{mod} (2012) [30].

Distance	Dist. parcourue, m	Dist. relative, m	N° du tube	de référence, mm	Profondeur, mm	Longueur, mm	Largeur, mm	Position angulaire, heure:min	Type	ERF B31G	ERF RSTRENG
0,0	289,9	2,2	360	11,1	11,7%	29	53	12:22	int	0,849	0,800
271,7	561,6	11,5	630	11,1	18,9%	29	29	05:46	int	0,850	0,802
326,7	616,6	0,8	690	11,1	12,6%	21	28	12:56	int	0,848	0,799
332,2	622,1	6,3	690	11,1	10,8%	21	32	02:46	ext	0,848	0,799
356,9	646,8	8,4	710	11,1	10,8%	30	45	10:58	int	0,849	0,800
434,7	724,6	8,6	780	11,1	12,6%	21	26	04:10	ext	0,848	0,799
436,7	726,6	10,6	780	11,1	15,3%	86	305	01:14	ext	0,865	0,817
443,5	733,4	5,5	790	11,1	12,6%	71	210	09:16	int	0,858	0,809
444,7	734,6	6,7	790	11,1	11,7%	44	38	10:40	int	0,851	0,803
473,1	763,0	10,7	810	11,1	13,5%	24	30	07:00	ext	0,848	0,800
555,0	844,9	2,7	890	11,1	13,5%	98	154	10:04	ext	0,866	0,818
559,1	849,0	6,9	890	11,1	10,8%	174	353	09:22	ext	0,875	0,830
560,2	850,1	7,9	890	11,1	13,5%	167	322	11:36	ext	0,882	0,837
587,0	876,9	1,7	920	11,1	11,7%	35	61	05:42	int	0,850	0,801
587,8	877,7	2,5	920	11,1	10,8%	41	60	11:00	int	0,850	0,802
588,8	878,7	3,5	920	11,1	10,8%	48	60	05:02	int	0,852	0,803
639,2	929,1	7,2	960	11,1	12,6%	30	34	11:00	ext	0,849	0,801
660,5	950,4	6,0	980	11,1	11,7%	44	138	05:42	ext	0,851	0,803
773,7	1063,6	0,3	1080	11,1	13,5%	33	52	04:40	int	0,850	0,801
805,1	1095,0	1,5	1110	11,1	18,0%	15	29	03:30	ext	0,848	0,799
943,8	1233,7	9,3	1230	11,1	11,7%	57	89	11:34	ext	0,854	0,805
1089,5	1379,4	7,8	1370	11,1	10,8%	18	30	05:58	int	0,848	0,799

Figure I.6 : Ensemble des indications dans un fichier d'inspection des canalisations.

I.2. Problème rencontré :

Sonatrach utilise 24 000 Km de canalisation pour le transport des gaz et du pétrole. Avec le temps ces canalisations vont se dégrader à cause de la corrosion qui se trouve à l'intérieur et/ou à l'extérieur d'un pipeline. Pour ce fait, une inspection doit être faite à l'aide d'un racleur instrumenté. Cet outil intelligent, permet d'avoir une idée détaillée sur l'ensemble des défauts dans la canalisation. Sur la base des valeurs de l'ERF, ces défauts de corrosion sont divisés en deux parties : défaut accepté et non accepté.

Pour les défauts acceptés ($ERF < 1$), il est nécessaire de calculer une nouvelle valeur de pression de service pour assurer la sécurité de notre canalisation corrodée, tout en gardant la continuité et la production. A ce propos, Sonatrach utilise les deux codes de calcul de la pression limite, tel que : ASME B31G (2009) [37] et ASME B31G_{mod} (2012) [37].

Durant notre stage au niveau de la direction centrale Recherche et Développement SONATRACH (DC-R&D), un problème a été rencontré concernant la fiabilité en terme de compromis sécurité et production des deux codes utilisés (ASME B31G (2009) [37] et ASME B31G_{mod} (2012) [37] pour le calcul de la pression limite.

A cet effet, le 20 avril 2011 une analyse sur un tube fortement corrodé a été conduite par la DRC et le projet MNI, afin d'étudier le comportement de l'acier et la corrosion lors de l'essai d'éclatement et de vérifier ainsi le degré de sévérité des normes en vigueur.

Dans le but d'anticiper le maintien du régime opérationnel sur le gazoduc dans des conditions de sécurité optimales, des analyses sur un tube fortement corrodé ont été menées dans la région ouest de l'Algérie. Pour étudier le comportement de l'acier API 5L X60, les responsables de la corrosion de l'essai d'éclatement ont vérifiés la sécurité des normes demandées. Cet essai a été limité aux tubes installés en 1981.

Tableau I.1. Information générale du pipeline [30].

Diamètre (mm)	1067 mm
Epaisseur (mm)	11,91 - 12,7
Nuance	API 5L X 60
Pression max autorisé (MAOP) (MPa)	69 bars
Pression max actuelle	73 bars
Date de début de service (an)	1981
Date du rapport	2011

Le test s'est déroulé en deux étapes : d'abord examiner l'étendue de la corrosion par rapport aux résultats de l'outil intelligent, puis tester l'éclatement et analyser les données préliminaires. Un exemple de méthode de planification d'inspection basée sur le risque est donné pour un oléoduc sous-marin d'exportation de pétrole installé en 1981. Le tableau 1 représente les informations générales sur l'oléoduc, avec les résultats de l'inspection du défaut de corrosion en 2011. Par une inspection interne du pipeline à l'aide de l'outil intelligent MFL (Magnetic Flux Leakage), les zones de corrosion collectées peuvent être mesurées avec la localisation, la taille et l'évaluation des anomalies sur toute la longueur. Les données recueillies ont été téléchargées et traitées pour l'évaluation de la longueur totale du pipeline, des détails d'un pipeline sous-marin, tels que les segments et les emplacements de corrosion, comme le montre la figure 59 [30].

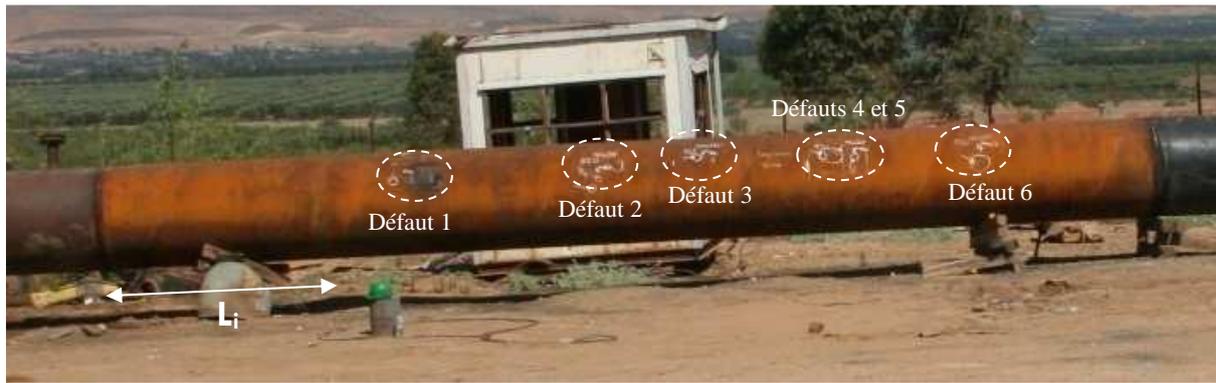


Figure I.7 : Localisation des défauts critiques dans le pipeline utilisé [30].

Les mesures des instances et de la profondeur de pénétration de la corrosion sur la face interne des pipelines en exploitation ont été recueillies. Le résultat de l'inspection du pipeline a donné que 67 défauts ont été détectés, six défauts critiques ont été sélectionnés avec un rapport de profondeur supérieur à 50% de l'épaisseur (Tableau I.2). Les pressions de rupture considérées ci-dessous ont été calculées sans tenir compte du coefficient de sécurité pour l'emplacement de la canalisation.

Table I.2 : Dimension, position et pression limite des défauts de tuyauterie calculés par la B31G et la B31G modifiée [30].

Défaut N° (m)	Distance L_i (mm)	Profondeur (%)	Position horaire heure : min	Pression limite (bar)		Pression d'éclatement réelle (bar)
				B31G	B31G _{mod}	
1	3.59	75.6	03:32	24.7	45.7	90
2	5.17	58.8	03:44	69.9	65.1	
3	6.09	73.1	03:02	60.9	51.9	
4	6.88	58,8	04:22	78.0	76.0	
5	7.74	65.8	02:48	69.1	64.1	
6	10.38	50.4	08:50	79.7	78.8	

La figure suivante peut être également utilisée pour identifier les colonies de défauts (indiquées par des cases), à partir desquelles des effets localisés ont pu se produire. Il est évident que l'on peut voir maintenant où se trouve le pourcentage le plus élevé de défauts. La zone des défauts inférieurs à <50% semblait être plus occupée. Cependant, le défaut de rupture s'est localisé dans de petites zones de colonies de défauts, mais avec un rapport de profondeur $d/t > 50\%$.

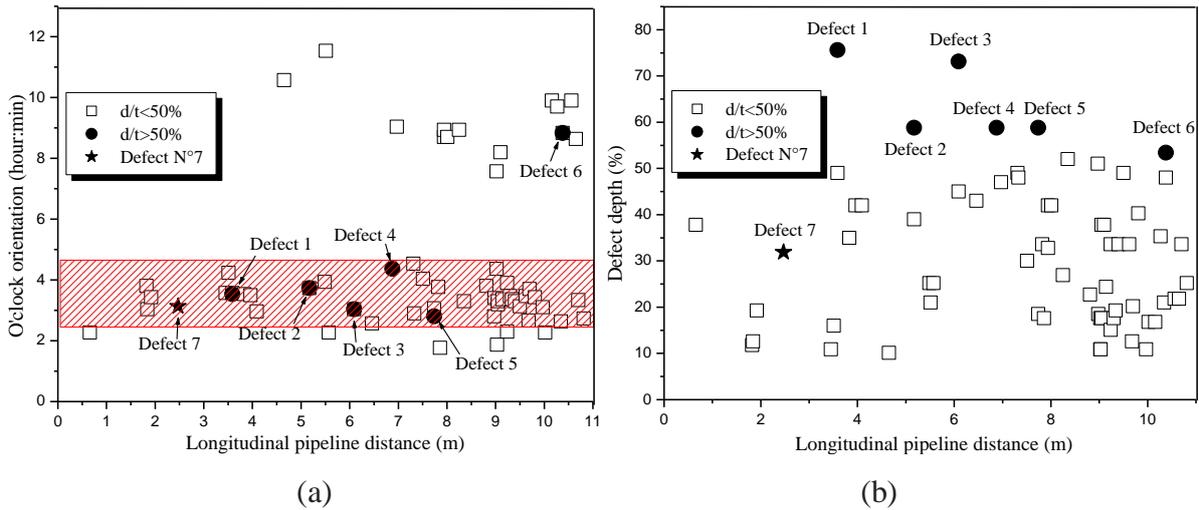


Figure I.8 : Taille et localisation des défauts en fonction de la distance longitudinale de la canalisation, (a) orientation à gauche et (b) rapport de profondeur des défauts, (b) profondeur des défauts [30].

Les défauts sélectionnés ont des positions horaires entre 2:30 et 4:30, représentées par la zone rouge (FigureI.9), cette zone a une concentration de colonie de défauts.

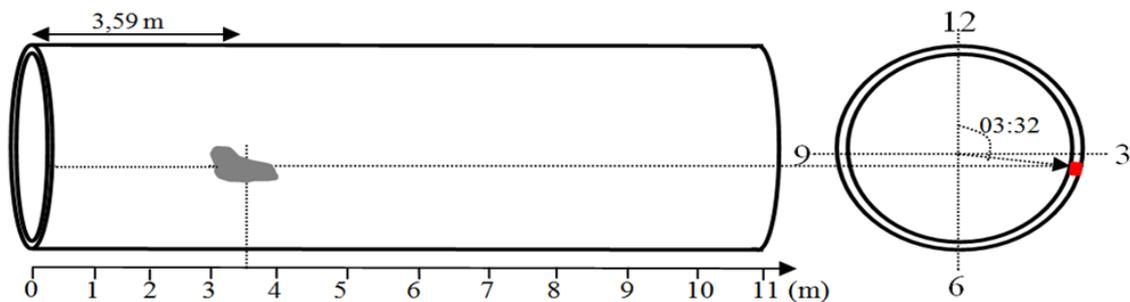


Figure I.9 : Exemple de vue schématique du défaut N°1 dans la canalisation [30].

Le tableau I.2 montre que la canalisation s'est rompue à une pression limite égale à 45,7 bars au niveau du défaut N°1. D'autre part, dans la figure I.8, nous pouvons voir que le défaut N°1 est le défaut critique par rapport aux autres, car il a une profondeur critique et une concentration de défauts en colonie. La figure I.10 montre le défaut N°1 avant l'essai d'éclatement.



Figure I.10 : Présentation du défaut N°1 avant l'essai d'éclatement.

Tous les défauts signalés ont été évalués selon les différentes normes. Cette approche utilise la longueur axiale, l'extension circonférentielle ainsi que la profondeur pour la détermination de la nouvelle pression de sécurité. Pour l'essai d'éclatement, le résultat a mis en évidence la plus conservatrice des normes actuelles utilisées. Et la recommandation que d'autres tests soient menés jusqu'à une base de données nécessaire pour une gestion optimale de l'intégrité.

L'essai est réalisé en situation statique, la canalisation a fui dans le défaut N°1 à la pression d'éclatement $P_b=90$ bar (Figure I.11). En comparant ce résultat avec le résultat des codes de pression limite utilisés (Tableau I.2), nous pouvons voir que les normes utilisées (B31G et B31G modifié) sont plus conservatrices [30].



Figure I.11 : Résistance de l'ensemble du nid de corrosion (a) et état du gommage (b) à 90 bars de pression.

I.3. Méthodologie :

Suite au test d'éclatement réalisé au niveau de SONATRACH les résultats ont montrés que les deux méthodes ASME B31G [37] et ASME B31Gmod [37] utilisés pour le calcul de la pression

limite sont très conservatrices, ce qui implique qu'elles favorisent la sécurité que la production. Ce travail a pour objectif de faire une étude comparative des différentes méthodes de calcul de la pression limite existantes dans la littérature (DNV RP F-101 [38], SHELL [39], P-CORRC [40], NETTO [42] et CSA Z662 [41]). Cette comparaison va être faite d'après une base de données qui regroupe 329 tests d'éclatement publiés dans la littérature. En dernier lieu une nouvelle approche va être proposée qui est basée sur la méthode des éléments finis en utilisant un logiciel commercial ANSYS.

Chapitre II :
Généralités sur le transport d'hydrocarbure par
canalisation



Chapitre II : Généralités sur le transport d'hydrocarbure par canalisation

II.1. Introduction

Plus de 3.8 millions de km d'oléoducs et de gazoducs ont été construits dans le monde. L'Algérie possède plus de 24 000 km de pipelines en acier API 5L destiné pour le transport d'hydrocarbure.

Depuis plus de cinquante ans, la politique d'investissement de TRC est guidée par les choix politiques et stratégiques de SONATRACH, véritable locomotive du développement économique de l'Algérie. Le rôle de l'Activité Transport par Canalisations, en tant que maillon opérationnel de la stratégie de SONATRACH, est d'optimiser les services apportés aux autres Activités et aux partenaires, en amont et en aval de la chaîne de valeur du Groupe, en développant le réseau de transport et en fiabilisant et sécurisant son exploitation. Le réseau de transport par canalisation s'est considérablement densifié au fil des années sur le territoire national. Il s'étend aujourd'hui, sur près de 24 000 kilomètres dont 53% sont dédiés au transport du gaz naturel.

SONATRACH exploite un réseau de transport par canalisation des hydrocarbures (Pétrole Brut, Condensat, Gaz Naturel et Gaz Pétrole Liquéfié), composé de 22 Systèmes de Transport par Canalisation (STC). Un STC est constitué d'une ou plusieurs canalisation(s) transportant des Hydrocarbures, y compris les installations intégrées, et les capacités de stockage liées à ces ouvrages, notamment les stations de compression, les stations de pompage, les postes de coupure, les postes de sectionnement, les lignes d'expédition, les postes de chargement à quai et en mer ainsi que les systèmes de protection cathodique, de comptage, de régulation, de télécommunications et de télé-contrôle. La gestion desdits STC s'opère à travers six (06) Directions Régionales (RTO, RTH, RTE, RTI, RTC, HRM) et deux (02) Directions Opérationnelles (GEM et GPDF). Les capacités de transport réelles, réservées et disponibles des différents Systèmes de Transport par Canalisation déclarées pour l'année 2021 se présentent comme suit :

- Capacité totale réelle : 404,342 MTEP dont 264,182 MTEP concernant le Réseau Nord et 140,160 MTEP pour le Réseau Sud ;
- Capacité totale réservée : 229,467 MTEP soit 57 % de la capacité réelle ;
- Capacité totale disponible : 174,875 MTEP

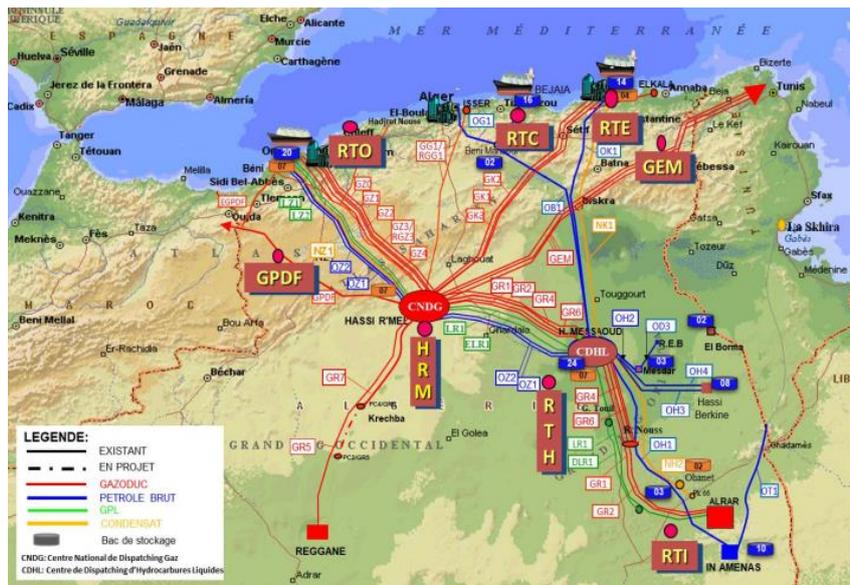


Figure II.1 : Cartographie actuelle du Réseau de Transport [33].

II.2. Cause de défaillance du pipeline

Bien que les pipelines constituent un moyen sûr et économique de transporter du gaz naturel et des liquides dangereux, les fuites et les ruptures de pipelines peuvent avoir des conséquences désastreuses. Les pipelines sont sensibles à différents mécanismes de défaillance métallurgique, mais sans s'y limiter, les défauts de fabrication, les dommages causés par des tiers et la corrosion. Il est essentiel de comprendre ces mécanismes de défaillance pour atténuer le risque des futurs incidents et gérer l'intégrité future du pipeline. Parmi tous les défauts des systèmes de pipelines, les défauts de corrosion sont proportionnellement les plus importants, tel que :

- Corrosion externe
- Corrosion et érosion internes
- Eraflures
- Enfouissement
- Fissure
- Défauts de construction et d'assemblage
- Dommages mécaniques
- Défauts des tuyaux et des pièces de raccordement
- Catastrophes naturelles
- Non-respect des règles et normes d'exploitation

Les corrosions sont normalement classées en deux catégories : la corrosion douce et la corrosion acide. La corrosion douce est définie comme la détérioration du métal causée par le contact

avec le dioxyde de carbone (CO₂) dans l'eau. La corrosion acide, quant à elle, est causée par le sulfure d'hydrogène (H₂S) ou un autre gaz acide

En général, les corrosions peuvent être observées soit du côté interne, soit du côté externe de la paroi de la canalisation. La figure II.1 présente des exemples de corrosions externes observées dans des pipelines. L'évolution des corrosions internes se comporte également de la même manière mais du côté opposé de la paroi du pipeline [34].

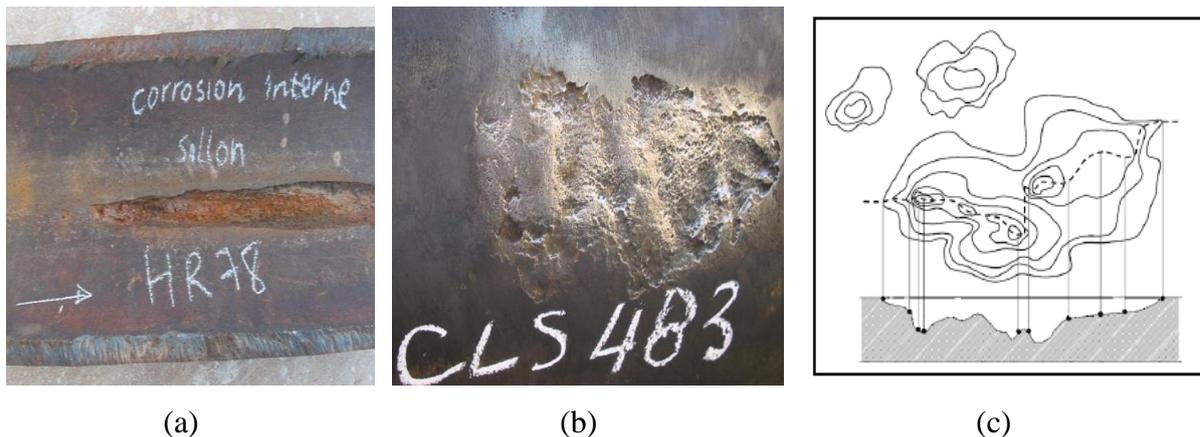


Figure II.2 : Exemples de corrosions généralisées dans les pipelines, (a) Corrosion interne (TRC, 2013), (b) Corrosion externe (Sonatrach- HASSI R'mel, 2015) (c) Croquis sur la longueur, la largeur et la profondeur irrégulières d'un défaut de corrosion typique.

Un exemple de la corrosion externe d'un pipeline dans la société algérienne. Cette approche expérimentale de la corrosion peut être vue à partir de ce qui a été trouvé dans le CC5 (Centre de Compression numéro 5) Kenanda-RELEZAN, comme le montre la Figure II.2.



Figure II.3 : (a) Exemples de défaillances de pipelines dues à des corrosions externes (TRC, 2016), (b) Esquisse sur la longueur, la largeur et la profondeur irrégulières d'un défaut de corrosion typique (TRC, 2011).

II.3. Inspection et contrôle de la corrosion des pipelines

L'inspection des pipelines fait partie de la gestion de l'intégrité des pipelines afin de les maintenir en bon état. Les règles qui régissent l'inspection sont les règles de sécurité des pipelines.

Le règlement sur la sécurité des pipelines exige que l'exploitant s'assure que le pipeline est maintenu dans un état efficace, en bon état de fonctionnement et en bon état de réparation. En fait, l'exploitant du pipeline a tout intérêt à ce que le pipeline soit exploité de manière efficace et sûre afin de satisfaire l'autorité compétente et d'éviter les coûts de défaillance en matière d'environnement, de perte de production et de réparation. L'inspection du pipeline comprend une inspection externe et une inspection interne [32].

II.4. Intégrité management des canalisations

Après inspection des canalisations par racleur instrumenté, les différentes indications rapportées sont des pertes de métal externe et interne. La figure II.3 montre un exemple de distribution des défauts de corrosion dans un tronçon de 50 Km. On remarque que les défauts internes représentent plus de 90% des défauts.

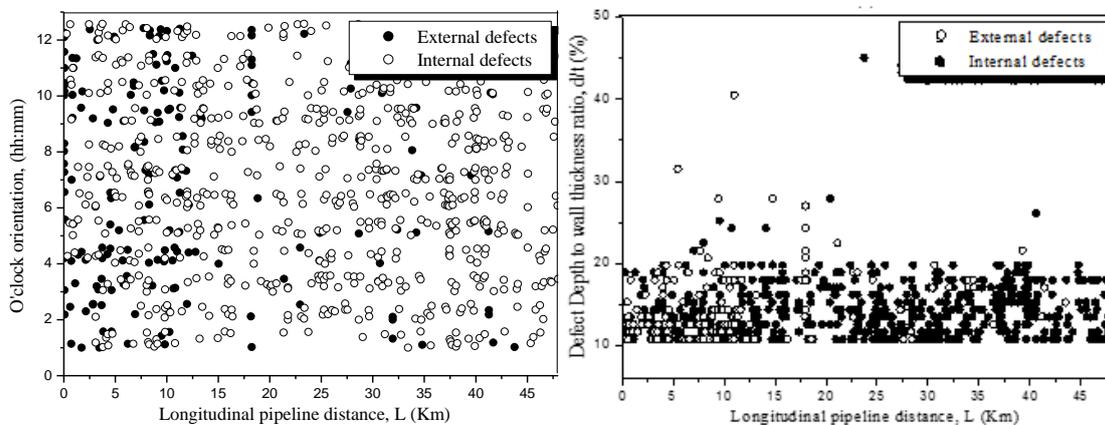


Figure.II.4 : Distribution des défauts à l'intérieur et à l'extérieur du pipeline [5].

Le critère d'évaluation utilisé pour les pertes métalliques dont on suppose qu'il s'agit de corrosion est l'ERF. Sonatrach utilise les formules de calcul de l'ERF présenté dans la norme ASME B31G_{mod} (2012) et les mesures de perte métallique qui ont été données par le racleur instrumenté, sans tenir compte de l'imprécision.

L'ERF est calculé à partir de l'équation suivante :

$$ERF = \frac{MAOP}{P_{SAFE}} \quad (II.1)$$

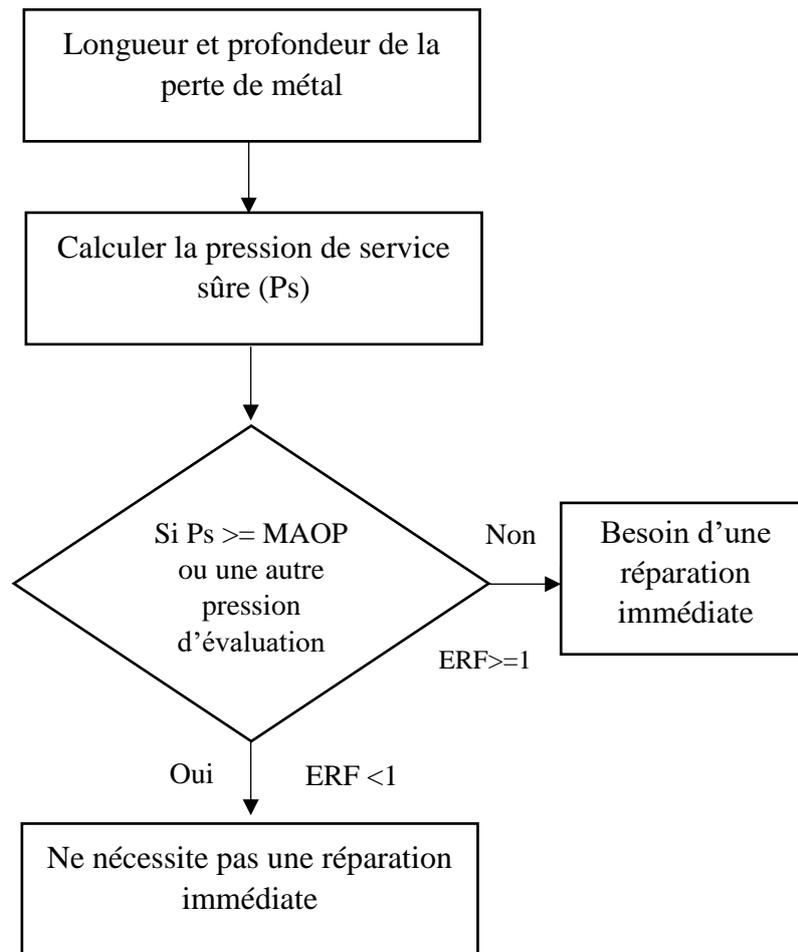


Figure II.5 : Procédure de détermination de l'ERF pour divers défauts.

La règle générale veut qu'en cas de corrosion interne ou externe avec un $ERF > 1$, l'indication rapportée doit être réparé. Pour un $ERF < 1$, une nouvelle pression de service doit être calculé, en utilisant le code de calcul de l'ASME B31G [37] ou l'ASME B31G_{mod} [37].

II.4.1. Méthodes de réparation

Comme nous l'avons mentionné avant, pour un $ERF > 1$, ça nécessite une réparation. Les méthodes de réparation sont présentées dans l'ASME PCC2 comme suivant :

II.4.1.1 Retrait et remplacement d'un tronçon défectueux

Parfois, il est à la fois possible et souhaitable d'enlever une section de conduite défectueuse et de la remplacer par une nouvelle conduite plutôt que de tenter un autre type de réparation. L'enlèvement nécessite la fermeture ou l'isolation et la dépressurisation du tronçon de pipeline concerné. La section défectueuse du tronçon est alors découpée sous forme de cylindre. Cette

section retirée est normalement remplacée par une section pré-testée de conduite saine, les soudures de raccordement sont inspectées et le pipeline est remis en service normal [34].

II.4.1.2 Manchons de type A (renforcement)

Le manchon de type A est particulièrement intéressant car il peut être installé sur un pipeline sans être soudé à la conduite porteuse. Un tel manchon permet de renforcer la zone défectueuse. Il ne peut pas contenir de pression et n'est utilisé que pour les défauts sans fuite. Il doit être installé à un niveau de pression inférieur à celui auquel on peut s'attendre à ce que la zone de la conduite présentant le défaut se rompe [34].

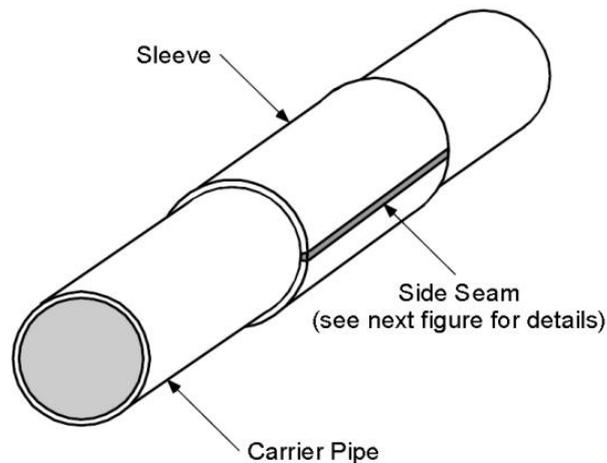


Figure II.6 : Schéma d'un manchon de type A.

II.4.1.3. Manchons de type B

Les extrémités d'un manchon de type B sont soudées d'angle au tuyau porteur. L'installation d'un manchon de type B est illustrée à la figure II.7. Puisque ses extrémités sont fixées au tuyau porteur, un manchon de type B peut être utilisé pour réparer des fuites et renforcer des défauts orientés dans le sens circonférentiel. En fait, un manchon de type B a été utilisé à la place d'une soudure circonférentielle pour réaliser un raccordement sur un pipeline. Étant donné qu'un manchon de type B peut contenir de la pression et/ou supporter une contrainte longitudinale importante imposée au pipeline par des charges latérales, il doit être conçu pour supporter la pression totale de la conduite porteuse. En outre, il devrait être fabriqué et inspecté avec soin pour garantir son intégrité [34].

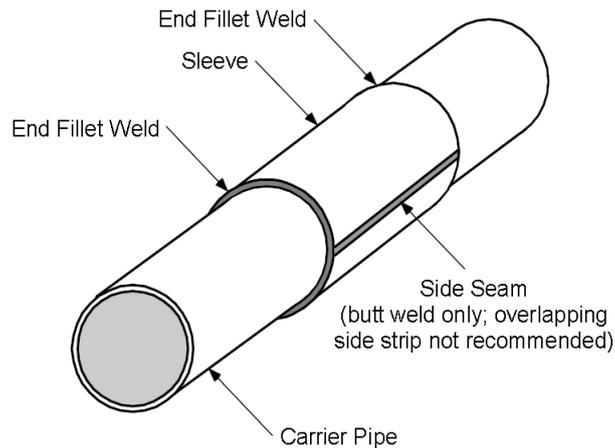


Figure II.7 : Installation d'un manchon de réparation de type B.

II.4.1.4. Système de réparation par manchon composite

Un manchon composite fabriqué à partir de fibres de verre et de résine polyester. Le manchon est coloré en jaune sur la photographie ci-dessous, Figure II.8. Le manchon est fabriqué dans les installations de production de manchons composites dans le cadre d'un système de gestion de la qualité approuvé. Il s'agit d'une bobine continue, fabriquée à des diamètres spécifiques pour correspondre aux diamètres des tuyaux et enroulée autour du tuyau pour fournir le renforcement, figure II.8. Les propriétés mécaniques sont donc très reproductibles. Cela signifie également que l'élément de renforcement est fabriqué dans des conditions contrôlées, et que seul le processus tolérant de collage est réalisé sur site. L'installation prend entre 20 et 30 minutes, le durcissement de l'adhésif étant réalisé en deux heures environ, après quoi la zone de réparation peut être enduite et remblayée. La philosophie qui a présidé au développement du manchon composite était de créer un système facile à utiliser sur le chantier, dont l'installation pouvait être effectuée par des techniciens semi-qualifiés, tout en garantissant les performances du produit. L'élément clé de la résistance étant fabriqué en usine, les seuls points à contrôler sur le chantier sont la préparation de la surface, le mélange de l'adhésif, l'application de l'adhésif et le serrage de la bobine. Tous ces éléments sont faciles à gérer [34].



Figure II.8 : Méthode de réparation par manchon composite (RTO, 2013). (a) Défaut détecté, (b) Préparation de la surface, (c) Réparations localisées sur un tuyau en acier corrodé.

En Algérie, la société Sonatrach a utilisé un manchon composite de type Clock. Les manchons à ressort ont été largement utilisés depuis que les tests de validation ont été achevés (début des années 1990). Les réparations typiques sont appliquées aux pipelines de transmission (pétrole et gaz), aux colonnes montantes, aux supports de tuyaux, aux pipelines de traitement, etc. Quelques exemples d'applications courantes sont présentés ci-dessous. À ce jour, plus de 300 000 applications ont été réalisées avec succès [32].



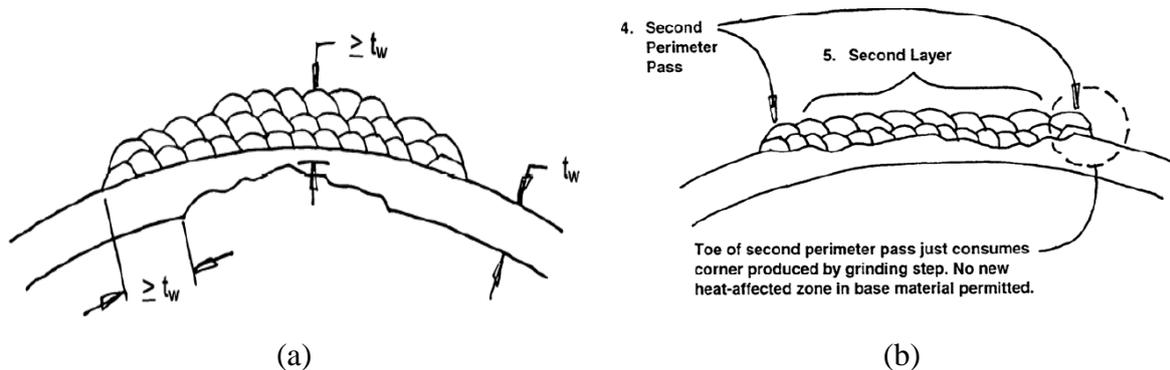
Figure II.9 : Réparation de l'état final de la manche (TRC, 2016).

II.4.1.5. Rechargement à chaud

La réparation de pipeline par rechargement de dépôt de soudure, est une alternative intéressante à l'installation des manchons en acier ou de renforcement composite pour la réparation des défauts de perte de métal des pipelines en service. Cette technique est directe, relativement rapide et peu coûteuse, ne crée pas de problèmes de corrosion supplémentaires et ne nécessite aucun matériau supplémentaire au-delà des consommables de soudage.

Dans le rechargement des défauts, il est important d'utiliser un soudage multi-passes en utilisant le beurrage pour avoir un revenu du grain de la première passe avec des niveaux d'apport de

chaleur plus élevés sont utilisés pour la deuxième couche et les couches suivantes pour affiner et tempérer davantage la ZAT de la première couche [35].



Figures II.10 : (a) Défaut interne avec remplissage externe, (b) Défaut externe avec remplissage externe.

II.4.1.5.1 Limitations sur l'utilisation de la réparation par rechargement à chaud

- L'épaisseur minimale restante pour laquelle une réparation par rechargement est de 3,2 mm (0,125 pouce).
- Lorsque l'épaisseur restante est mince, des électrodes de petit diamètre doit être utilisé (ASME PCC-2 Article 2.10).
- L'utilisation de la réparation par rechargement pour les défauts à proximité des joints de soudure et pour les fissures devrait être interdite.
- Ce type de réparation partielle n'est pas approprié pour les applications à pression cycle haute [35].

II.4.1.6 Collier de serrage

II.4.1.6.1 Deux pinces boulonnées (Bolt-On Clamps)

Ce sont des manchons sous pression avec une combinaison de boulonnage et de soudage. Tout d'abord, le manchon est placé sur la zone fuité, en suite un serrage spécifique qui doit être appliqué autour du tuyau à l'aide d'écrous-boulons pour arrêter les fuites. En fin de compte, tous les écrous sont également soudés aux boulons et aux corps de manchon pour assurer une réparation durable et étanche [35].

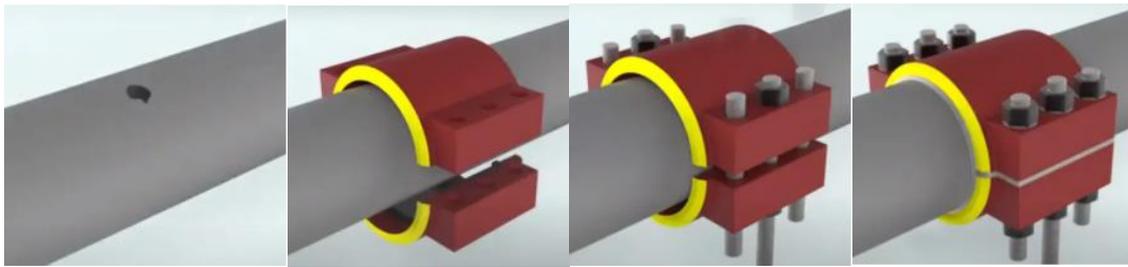


Figure II.11 : Installation du collier de serrage boulonné.

Ces manchons contiennent des joints d'étanchéité (longitudinaux et circonférentiels), ce qui permet d'avoir un bon état de l'étanchéité. Ils peuvent être installés comme un manchon de type A, ou soudés en tant que manchon de type B pour réparer une fuite en cas de défaillance des joints [35].

II.4.1.6.2 Collier de fuite (Leak Clamps)

Un collier de fuite est utilisé pour réparer les fuites dans les canalisations. Il se compose de bandes métalliques relativement légères avec un système d'assemblage par boulonnage pour le serrage sur la canalisation. Ce type de pince est généralement considéré comme une réparation temporaire, qui ne doit durer que jusqu'à ce qu'une réparation permanente puisse être effectuée [35].



Figure II.12 : Collier de serrage de fuite.

II.4.1.7 Piquage en charge

Le piquage en charge est la méthode de connexion à des tuyaux existants sous pression, sans l'interruption qu'occasionnerait la vidange de la partie de l'installation où il s'effectue. Cela signifie qu'une canalisation ou un conteneur peut continuer à être utilisé, pendant que des

opérations de maintenance ou des modifications lui sont apportés. Ce processus est aussi utilisé pour vidanger les fluides de boîtiers sous pression [35].

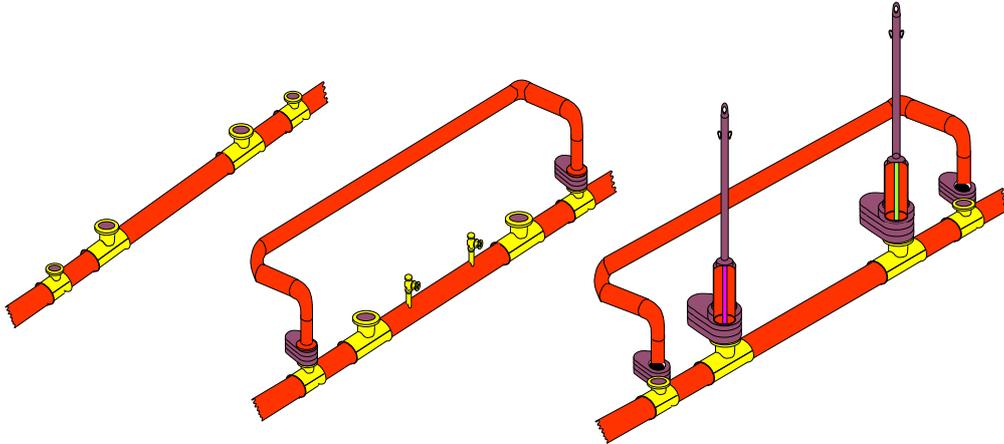
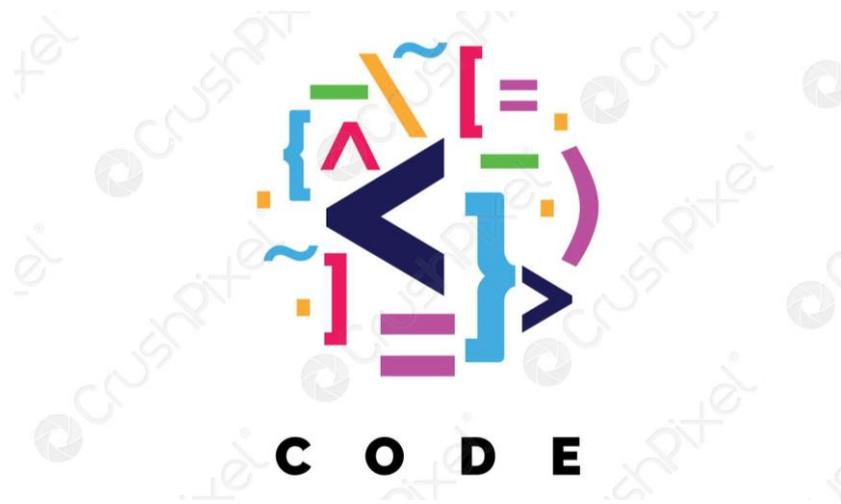


Figure II.13 : Processus d'installation du piquage en charge.

II.4.2. Calcul de la pression limite

Pour les défauts ayant un $ERF < 1$, il est nécessaire de recalculer une nouvelle pression de service limite pour assurer la continuité de la production (shut down). Cette pression limite est calculée par différents codes standards. C'est ce qui va être montré dans le chapitre suivant.

Chapitre III :
Codes de calcul de la pression limite des canalisations
corrodées



Chapitre III : Codes de calcul de la pression limite des canalisations corrodées

III.1. Introduction

Au fur et à mesure qu'un pipeline vieillit, il peut être affecté par une série de mécanismes de corrosion, qui peuvent conduire à une réduction de son intégrité structurelle et à une défaillance éventuelle. Les conséquences économiques d'une réduction de la pression de fonctionnement, d'une perte de production due aux temps d'arrêt, aux réparations ou de remplacement peuvent être graves et, dans certains cas, inabordables. Ainsi, il existe plusieurs pipelines maintenus en service même si des signes de corrosion sont visibles sur leur surface externe. La plupart de ces pipelines sont autorisés à fonctionner après avoir recalculé la pression interne maximale admissible du produit transporté. Les défauts de perte de métal résultant de la corrosion, tant interne qu'externe, sont des formes insidieuses d'endommagement des conduites qui peuvent, lorsqu'elles ne sont pas reconnues, entraîner une défaillance prématurée des conduites, lorsqu'elles ne sont pas reconnues, d'entraîner une défaillance prématurée de la conduite. Les défauts de corrosion se présentent sous la forme de défauts isolés ou groupés, chacun ayant des conséquences différentes soit une fuite localisée, soit une rupture. Entre 2010 et 2013, les défaillances de canalisations dues à la corrosion et à la dégradation des matériaux ont entraîné des pertes financières de plus de 466 millions de dollars de coûts totaux estimés pour les opérateurs de réseaux de gazoducs [36]. La capacité à prédire la pression de défaillance de chacune de ces formes de défauts de corrosion est extrêmement précieuse pour les exploitants de conduites afin de préserver leur intégrité. Une meilleure compréhension de la défaillance des conduites ouvre également la voie à des améliorations des stratégies futures de réparation et de maintenance. L'évaluation des défauts a fait l'objet de recherches depuis les années 1970 jusqu'à aujourd'hui.

III.2. Modèle de Barlow

Considérons une canalisation d'une longueur unitaire fonctionnant à une pression interne P , un diamètre D et une épaisseur de paroi t , qui est soumise à une pression externe P_o . Le diagramme libre de la direction circonférentielle de cette canalisation est représenté à la figure (III.1). Dans le cas où la pression externe est omise et où seule la direction verticale est envisagée, la figure (III.1.b) montre le diagramme libre correspondant. Sur la base d'un équilibre vertical et de la

contrainte circonférentielle ou tangentielle moyenne h , la pression interne peut être estimée à l'aide de la méthode de Barlow.

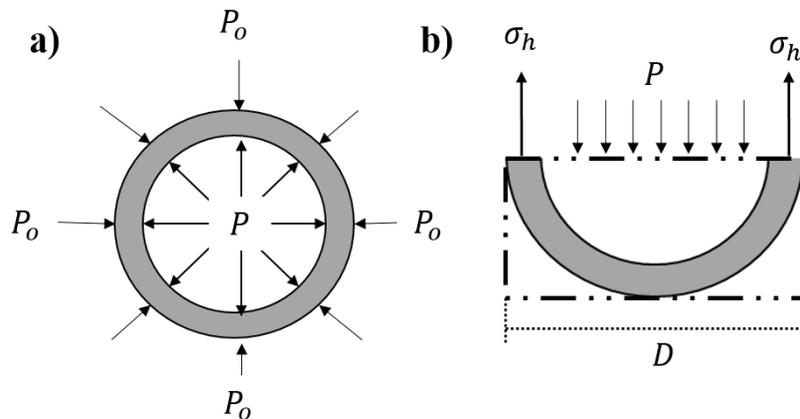


Figure III.1 : Diagramme libre d'une canalisation pressurisée.

La formule de Barlow estime la pression interne qu'un tuyau peut supporter compte tenu de sa géométrie (t/D) et de la résistance du matériau (h). La contrainte circonférentielle peut être remplacée par les résistances limite (y) ou ultime (u) multipliées par un facteur de sécurité F , qui change en fonction de l'approche.

$$P = \frac{\sigma_0}{2tD} \quad (\text{III.1})$$

Où P , σ_0 , t et D sont respectivement la pression d'éclatement, la contrainte admissible, l'épaisseur de la paroi du pipeline et le diamètre du pipeline.

La formule de Barlow est couramment utilisée dans l'industrie de la tuyauterie pour vérifier que les appareils à pression et les tuyaux utilisés pour les lignes de collecte, de transmission et de distribution peuvent supporter en toute sécurité les pressions d'exploitation. Aujourd'hui, nous voyons également une modification de la formule de Barlow qui incorpore un facteur de sécurité dans le calcul :

$$P = \frac{2 \times \sigma_0 \times T}{D \times S_F} \quad (\text{III.2})$$

Où S_F est le facteur de sécurité. Dans le DOT 192, le gouvernement fédéral a défini les valeurs numériques du facteur de sécurité en fonction de l'emplacement physique de l'appareil sous pression.

III.3. ASME B31G et ASME B31G modifié

ASME B31G [37] est un code pour l'évaluation de la résistance résiduelle des canalisations corrodées. Il s'agit d'un supplément au code ASME B31 pour les canalisations sous pression. Le code a été développé à la fin des années 1960 et au début des années 1970 au Batelle Memorial Institute et fournit une procédure semi-empirique pour l'évaluation des conduites corrodées. Sur la base d'une vaste série d'essais en grandeur réelle sur des sections de tuyaux corrodés, il a été conclu que les aciers pour pipelines ont une ténacité adéquate et que la ténacité n'est pas un facteur significatif. La rupture des défauts de corrosion émoussés est contrôlée par leur taille et la contrainte d'écoulement ou la contrainte d'élasticité du matériau. Les paramètres d'entrée comprennent le diamètre extérieur (D) et l'épaisseur de la paroi (t) du tuyau, la limite d'élasticité minimale spécifiée (Re), la pression de service maximale admissible (MAOP), longueur de défaut (L) et la profondeur du défaut (d). Selon le code ASME B31G, une équation de défaillance pour les pipelines corrodés a été proposée au moyen des données des expériences d'éclatement et exprimée en tenant compte des deux conditions suivantes. Premièrement, la contrainte périphérique maximale ne peut pas dépasser la limite d'élasticité du matériau ($R_{\max} < Re$). Deuxièmement, la corrosion relativement courte est projetée sur la forme d'une parabole et la corrosion longue est projetée sur la forme d'un rectangle.

Défauts paraboliques :

$$P_f = \frac{2(1.1Re)t}{D} \left[\frac{1 - \frac{2d}{3t}}{1 - \frac{2d}{3tM}} \right] \quad (III.3)$$

$$\text{Où } M = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{L}{Dt} \right)^2}, \text{ pour } \sqrt{0.8 \left(\frac{L}{Dt} \right)^2} \leq 4 \quad (III.4)$$

Défauts rectangulaires

$$P_f = \frac{2(1.1Re)t}{D} \left[1 - \frac{d}{t} \right] \quad (III.5)$$

$$\text{Où } M = \infty \text{ pour } \sqrt{0.8 \left(\frac{L}{Dt} \right)^2} > 4 \quad (III.6)$$

Où P_f , D, d, t, M, Re et L sont respectivement la pression de rupture, le diamètre extérieur, la profondeur maximale de défaut, l'épaisseur de paroi, le facteur de renflement, la limite d'élasticité et la longueur du défaut de corrosion longitudinal. En raison de certains problèmes

liés à la définition de la contrainte d'écoulement, une nouvelle contrainte d'écoulement a été proposée : $\sigma_f = 1.1Re + 69$

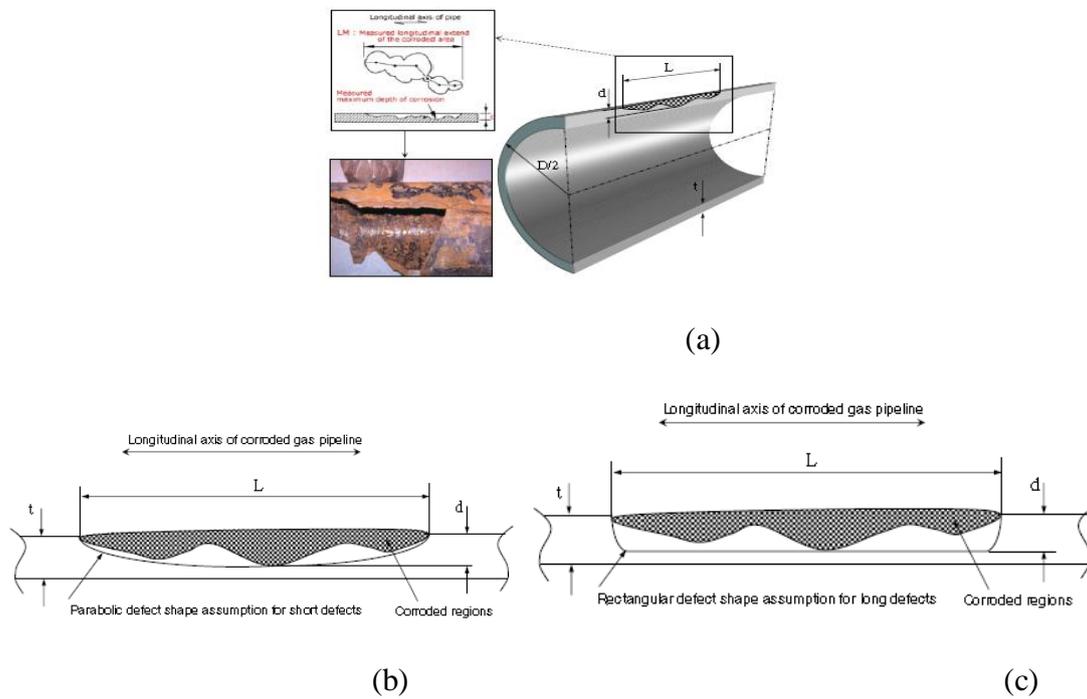


Figure III.2 : (a) Illustration typique de défauts de corrosion (axe longitudinal). (b) Défaut de corrosion court simplifié comme une courbe parabolique (ASME B31G). (c) Défauts de corrosion longs simplifiés comme un défaut rectangulaire.

La norme ASME B31G modifiée incluant cette nouvelle contrainte d'écoulement modifiée et le facteur de gonflement est la suivante :

$$P_f = \frac{2(1.1R_e + 69)t}{D} \left[\frac{1 - 0.85 \frac{d}{t}}{1 - 0.85 \frac{d}{tM}} \right], \quad (III.7)$$

Où
$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \left(\frac{L^2}{Dt} \right) - 0.003375 \left(\frac{L^2}{Dt} \right)^2} \text{ pour } \left(\frac{L^2}{Dt} \right) \leq 50. \quad (III.8)$$

Et
$$M = 3.3 + 0.032 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right) \text{ pour } \left(\frac{L^2}{Dt} \right) \geq 50 \quad (III.9)$$

Il est nécessaire de rappeler que la norme ASME B31G est limitée à de faibles facteurs de concentration de contraintes et à des conditions de charge de pression interne. Dans la procédure d'évaluation, on considère la profondeur maximale et l'étendue longitudinale de la zone

corrodée, mais on ignore l'étendue circonférentielle et le profil réel. Si la zone corrodée est jugée inacceptable, la norme B31G autorise le recours à une analyse plus rigoureuse ou à un essai de pression hydrostatique afin de déterminer la résistance résiduelle de la conduite. Il est également possible d'imposer une pression de service maximale admissible inférieure.

III.4. DNV RP-F101

DNV RP-F101 [38] est le premier code complet et étendu pour l'évaluation des défauts de corrosion des pipelines. Il fournit des conseils pour la pression interne et les charges combinées. Il couvre tous les types de chargement, par exemple, la pression seule et le chargement combiné. En outre, il fournit des formulations codifiées pour la pression, la flexion et la profondeur de zone. La norme DNV RP-101 propose deux méthodes pour trouver la pression de rupture. La première méthode est basée sur le facteur de sécurité partiel et la seconde est classée comme la conception de la contrainte admissible. Les deux méthodes nécessitent des informations sur le diamètre extérieur du tube (D), l'épaisseur de la paroi (t), la résistance à la traction (R_m), la pression de service maximale admissible (MAOP), la longueur de défaut (L) et la profondeur du défaut (d). La méthode de conception de la contrainte admissible considérant les défauts sans interaction est discutée ici. Les procédures exactes pour la méthode du facteur de sécurité partiel et les défauts en interaction peuvent être trouvées dans le code DNV. Pour poursuivre la procédure de conception via la norme DNV RP-101, il est nécessaire de déterminer le type de chargement (pression seule et chargement combiné) et par conséquent, la pression de rupture peut être obtenue comme suit :

$$P_f = \frac{2R_m t}{D-t} \left[\frac{1-\frac{d}{t}}{1-\frac{d}{tQ}} \right] \text{ où } Q = \sqrt{1 + 0.31 \left(\frac{L^2}{Dt} \right)^2} \quad (\text{III.10})$$

Où P_f , D , d , t , Q et R_m sont respectivement la pression de rupture, le diamètre extérieur, la profondeur de défaut, l'épaisseur de paroi, le facteur de correction et la résistance à la traction ultime. Selon la norme DVN RP-101, la pression de rupture ne doit pas dépasser la pression de service de conception de contrainte maximale admissible (MAOP), sinon la conduite corrodée sera réparée ou remplacée avant d'être remise en service.

III.5. Shell92

Le modèle d'éclatement SHELL92 [39] est une modification du modèle ASME B31G avec des prédictions plus conservatrices en mettant en œuvre des formes de défauts rectangulaires. Cette approche est utilisée jusqu'à 85 % de l'épaisseur de la paroi du tuyau.

$$P_f = 2(0.9R_m) \frac{t}{D} \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{tM}} \right] \quad (\text{III.11})$$

Où le facteur de Folias est donné par

$$M = \sqrt{1 + 0.805 \frac{L^2}{Dt}} \quad (\text{III.12})$$

III.6. P-CORRC

En utilisant l'équation PCORRC [40], BMI a mené des recherches sur le mécanisme de base de la défaillance survenant dans le défaut de corrosion d'une conduite, et il a été découvert que la pression d'éclatement d'une conduite endommagée est régie par la résistance à la traction plutôt que par la contrainte d'écoulement. En outre, cela peut être utilisé pour prédire la contrainte résiduelle pour les tuyaux à haute ténacité, dans lesquels les défaillances se produisent par le mécanisme d'effondrement plastique. Sur la base des résultats des tests d'éclatement, l'analyse par éléments finis a été réalisée de la même manière, et l'équation développée est présentée dans l'équation suivante :

$$P_f = R_m \frac{2t}{D} \left[1 - \frac{d}{t} \left(1 - \exp \left(-0.157 \frac{L}{\sqrt{D(t-d)/2}} \right) \right) \right] \quad (\text{III.13})$$

Cette expression, baptisée PCORRC pour Pipeline CORROsion Criterion, est plus simple dans sa forme générale que la norme conventionnelle ASME B31G et possède un certain nombre de caractéristiques uniques qui résultent de sa base fondamentale.

L'expression PCORRC donnée dans l'équation (III.12) est un critère basé sur l'analyse pour estimer le risque d'explosion. Critère analytique permettant d'estimer la résistance restante des défauts de corrosion émoussés dans les conduites d'épaisseur moyenne à élevée qui se brisent par le mécanisme d'effondrement plastique. Bien que PCORRC ne soit pas un remplacement de la norme existante RSTRENG et ASME B31G, il s'agit d'un critère complémentaire pour les tuyaux de dureté moyenne à élevée

III.7. CSA Z662

La norme CSA Z662 [41] a été créée pour aider à fournir des directives sur la conception, la construction et l'entretien sécuritaires des réseaux de pipelines utilisés pour : Les hydrocarbures liquides, y compris le pétrole brut, les fluides multi phases, le condensat, les produits pétroliers liquides. Liquides de gaz naturel, et gaz de pétrole liquéfié. Eau/vapeur des champs pétrolifères Dioxyde de carbone utilisé dans les programmes de récupération assistée des gisements de pétrole.

Depuis sa première édition en 1994, la norme CSA Z662, Réseaux de canalisations de pétrole et de gaz, est l'aboutissement de plus de 40 ans d'élaboration de normes sur les pipelines.

La norme CSA Z662 est citée en référence dans la législation canadienne par les provinces, les territoires et le gouvernement fédéral. Il est donc essentiel que tous les professionnels de l'industrie comprennent et appliquent les exigences de cette nouvelle édition dès sa publication.

Les forces pour un tuyau corrodé et intact sont données par :

$$P_f = P \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{tM}} \right] \quad (\text{III.14})$$

$$P = 2t(0.9R_m) / D \quad \text{Pour } R_e > 241\text{MPa}$$

$$P = 2t(1.15R_e) / D \quad \text{Pour } R_e \leq 241\text{MPa}$$

$$\text{Et } M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{Dt} + 0.003375 \left(\frac{L^2}{Dt} \right)^2} \quad \text{pour } L^2 / Dt < 50 \quad (\text{III.15})$$

$$\text{Ou } M = 3.3 + 0.32L^2 / Dt \quad \text{pour } L^2 / Dt > 50$$

III.8. NETTO

Netto et al. (2005) [42] ont également développé une procédure simple pour estimer la pression d'éclatement des pipelines corrodés pipelines corrodés. Tout d'abord, ils ont réalisé une série d'essais à petite échelle utilisés pour calibrer un modèle numérique non linéaire.. La figure 4 illustre un exemple de test effectué pour évaluer la pression d'éclatement d'un spécimen. Ensuite, une série de simulations numériques a été réalisée pour différentes dimensions de corrosions. Sur la base des résultats expérimentaux et numériques, une formule analytique a été dérivée.

$$P_f = 1.1R_e 2t / D \left(1 - 0.9435 (d/t)^{1.6} (L/D)^{0.4} \right) \quad (\text{III.16})$$



Figure III.3 : Éprouvette après éclatement [17].

Chapitre IV :

Résultats et discussions



Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction

L'objectif de ce travail rentre dans le cadre de l'intégrité management des canalisations de transport d'hydrocarbure.

L'intégrité management représente la maintenance de la canalisation pour une meilleure durée de vie des pipelines. Les inspecteurs de surveillance doivent passer un stage sur les connaissances générales des canalisations de transport, pour comprendre et identifier les mécanismes de dégradation susceptible d'affecter une canalisation et connaître les méthodes de réparation associées.

Ce chapitre est divisé en deux parties ; la première partie est réservé pour l'étude d'évaluation des méthodes de calcul de la pression limite proposé dans la littérature, et cela pour objectif de comparer les méthodes en utilisant une base de donnée des tests d'éclatement expérimentaux des pipes contenant un défaut. Cette base de données représente l'ensemble des 329 tests d'éclatements publié en littérature. L'annexe A représente un tableau qui regroupe l'ensemble des tests d'éclatements, présentant les paramètres suivants ; la nuance de pipe (X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80, X100 et X120) et sa géométrie (diamètre, épaisseur, limite élastique et la résistance à la rupture), la forme du défaut (Box ou parabolique) et la taille du défaut (longueur, largeur et profondeur). Et cela afin de calculer la pression limite en utilisant des méthodes de calculs existants dans la littérature (ASME B31G [37], ASME B31Gmod [37], DNV RP F-101[38], SHELL [39], P-CORRC[40], NETTO[42] et CSA Z662[41]) et comparer les résultats avec la pression d'éclatement expérimental.

La deuxième partie illustre l'étude de simulation numérique à base de la méthode des éléments finis en utilisant un logiciel commercial appelé ANSYS. L'objectif de cette partie est de développer une nouvelle méthode de calcul de la pression limite basée sur la simulation numérique. Ce dernier va être comparé avec les méthodes de calcul de la pression limite utilisé dans la littérature.

IV.2. Etude statistique de la base de données

Dans cette partie, une base de données a été établie à partir des tests d'éclatements des pipes contenant un défaut (annexe A). Pour notre étude on a utilisé 329 tests d'éclatements présents dans la littérature.

La figure IV.1 représente la méthodologie qu'on a utilisé pour évaluer les méthodes de calcul de la pression limite. On distingue deux zones : la zone d'éclatement qui indique les valeurs supérieur à 1, ce qui veut dire que la pression calculé est supérieur à la pression réelle d'éclatement. Le facteur production est valorisé autour de la ligne de référence, par ailleurs le risque d'éclatement augmente une fois le rapport de pression augmente.

La seconde zone est la zone de sécurité qui indique les valeurs inférieur à 1, ce qui veut dire que la pression calculé est inférieur à la pression réelle d'éclatement. Cette zone favorise la sécurité en évitant le risque d'éclatement, par contre le facteur production est réduit une fois le rapport de pression diminue.

L'erreur ε représente en point de vue mathématique l'erreur entre la valeur prédictive et la valeur réelle. En point de vue physique les valeurs positives de l'erreur représentent le risque d'éclatement de pipe, contrairement aux valeurs négatives qui représentent une réduction de la production. Dans la zone d'éclatement le degré de danger augmente en fonction de l'erreur, on remarque que dans la zone de sécurité c'est la sureté qui augmente en fonction de l'erreur contrairement à la production qui diminue à chaque fois que l'erreur augmente, on remarque aussi que le nombre de points augmente avec la sureté et le danger diminue.

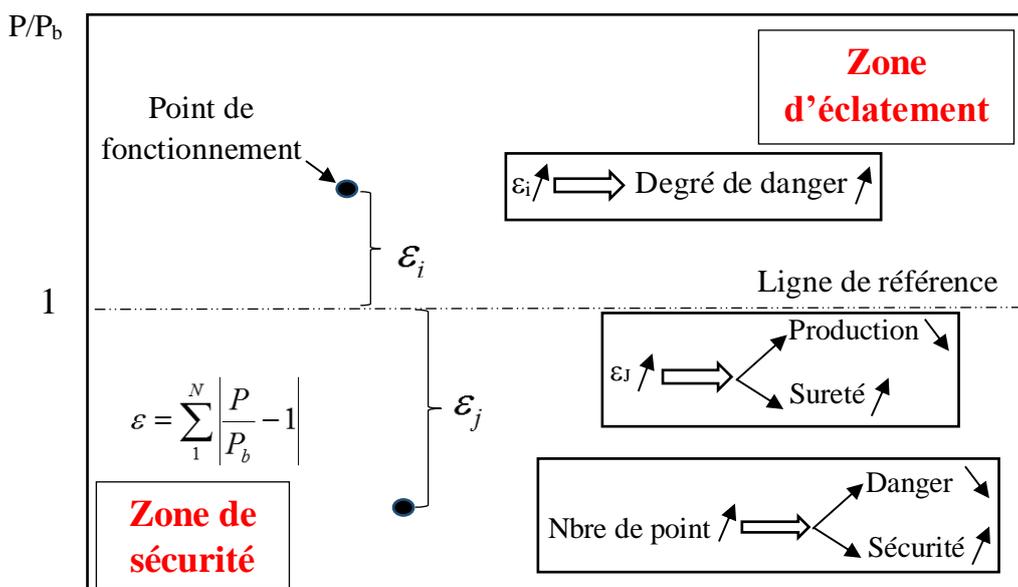


Figure IV.1 : Schéma présentatif de la méthodologie utilisée pour l'évaluation des méthodes de calcul de la pression limite.

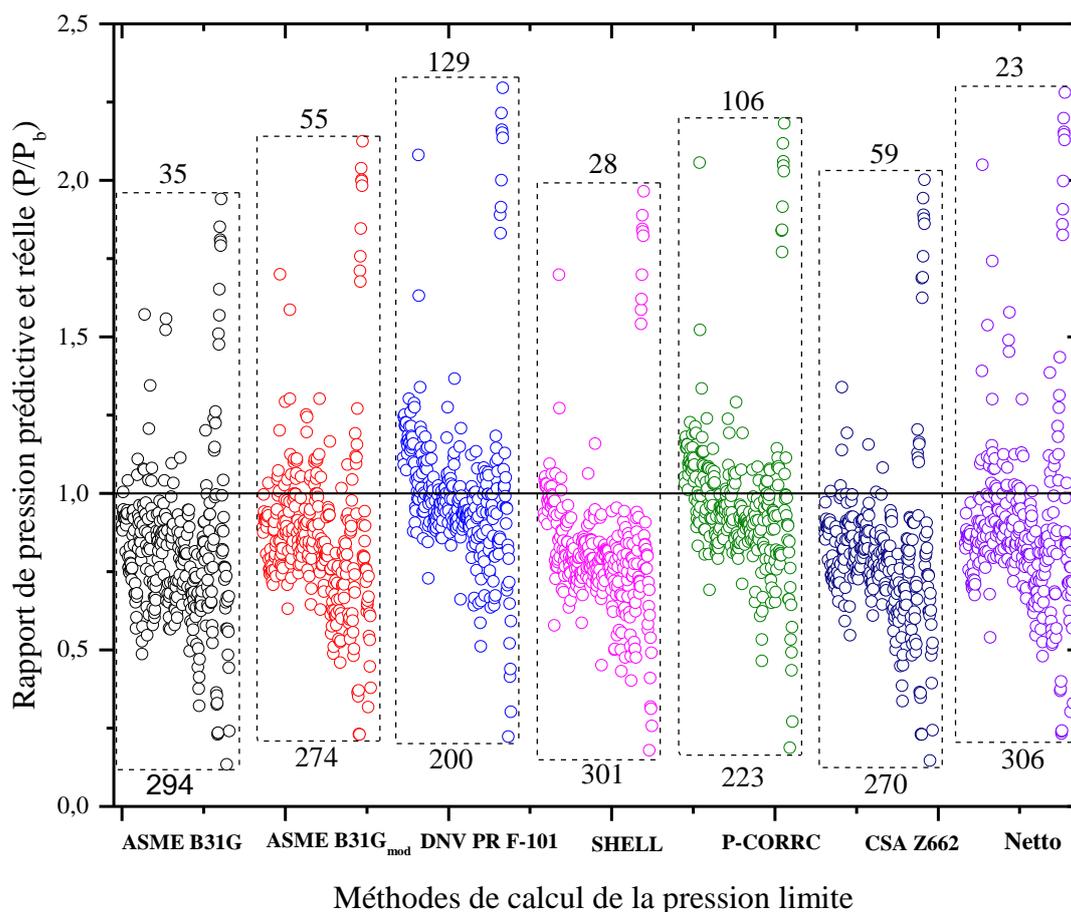
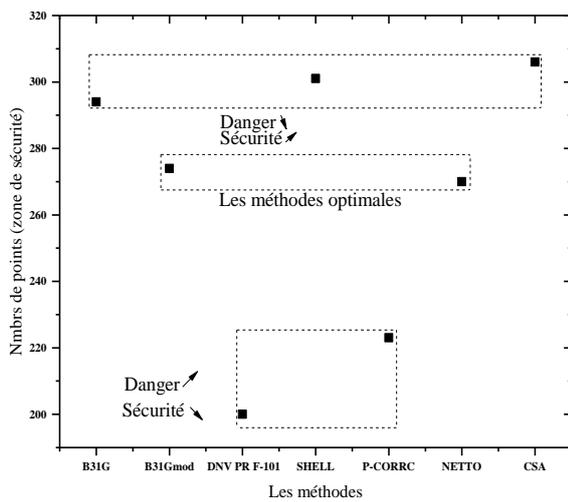


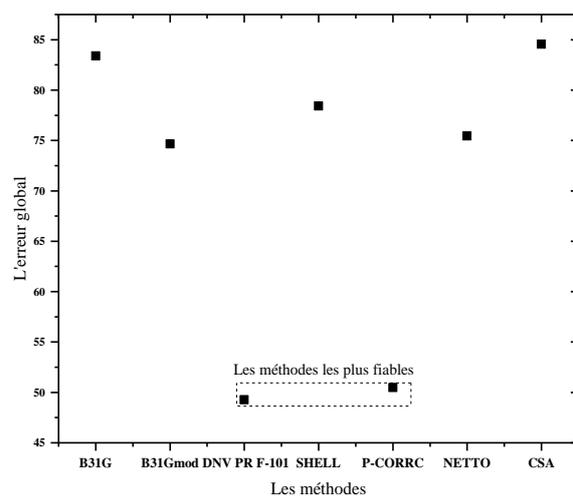
Figure IV.2 : La variation du rapport de pression calculée par les différentes méthodes.

Tableau IV.1 : Résultats statistique de la fiabilité des méthodes de calcul de la pression limite.

Méthode de calcul	Erreur globale	Défaillance			Sécurité		
		Nombre	ϵ		Nombre	ϵ	
B31G	83.40	35	10.64% (5)	10.69 (5)	294	89.36%	72.71
B31G _{mod}	74.65	55	16.72% (4)	13.17 (4)	274	83.28%	61.47
DNV RP F-101	49.28	129	39.21% (1)	22.92 (1)	200	60.79%	26.37
SHELL	78.42	28	8.51% (2)	10.60 (6)	301	91.49%	67.83
P-CORRC	50.47	106	32.22% (6)	19.30 (2)	223	67.78%	31.17
NETTO	75.44	59	17.93% (3)	16.36 (3)	270	82.07%	69.08
CSA Z662	84.54	23	6.99% (7)	9.11 (7)	306	93.01%	75.42



(a)



(b)

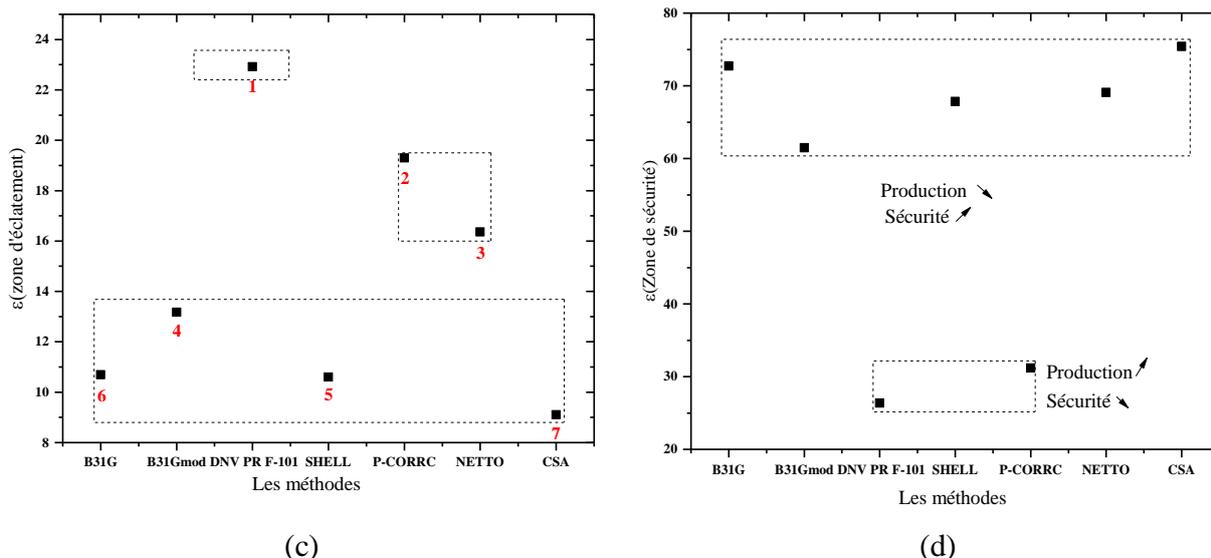


Figure IV.3 : Variation des paramètres statistiques pour chaque méthode de calcul. (a) Nombres de points dans la zone de sécurité, (b) Erreur globale, (c) Erreur dans la zone d'éclatement, (d) Erreur dans la zone de sécurité.

Dans les deux figures IV.2 et IV.3 et le tableau IV.1 on remarque les points suivants :

- Par rapport aux nombres de points dans la zone de sécurité on distingue que CSA Z-662[41], SHELL [39] et B31G [37] représentent respectivement les 3 méthodes les plus sécurisées, par contre les méthodes DNV RP F-101[38] et P-CORRC [40] représente respectivement les plus dangereuse. (Voir la figure VI.3 (a))
- Les 2 méthodes B31G_{mod} [37] et NETTO [42] c'est les méthodes optimales par rapport au compromis entre la sureté et la défaillance. (Voir la figure VI.3 (a))
- En point de vue mathématique, le modèle de calcul de la pression limite le plus fiable et DNV RP F-101 [38] et P-CORRC [40]. (Voir la figure VI.3 (b)).
- Dans la zone de d'éclatement, le classement des méthodes par rapport à leur degré de danger est le suivant : DNV RP F-101 [38], P-CORRC [40], NETTO [42], B31G_{mod} [37], B31G [37], SHELL [39] et enfin CSA Z662 [41]. (Voir la figure VI.3 (c)).
- Dans la zone de sécurité on a le compromis entre la sureté et la production. La méthode la plus sécurisé (plus conservatrice) est CSA Z662 [41], NETTO [42], SHELL [39], B31G_{mod}[37] et B31G [37], ensuite la méthode de calcul de la pression limite qui représente le minimum de la sureté (favorise la production) est DNV RP F-101 [38]et P-CORRC [40]. (Voir la figure IV.3 (d)).

IV.3. Interprétation

Comme on l'a mentionné dans le premier chapitre, l'activité de transport par canalisation TRC de la SONNATRACH utilise dans les calculs de la pression limite les deux codes ASME B31G

(2009) et ASME B31G_{mod} (2012) [37]. Selon les deux figures IV.3(a) et (d), ces deux méthodes favorisent beaucoup plus la sûreté que la production. On a conclu que les deux méthodes DNV RP F-101 [38] et P-CORRC [40] sont les deux qui favorisent le plus la production, mais le degré de danger de la DNV RP F-101 [38] mentionné dans la figure est très élevé ce qui nous contraint à la déconseiller. Par contre les méthodes B31G [37], B31G_{mod} [37], SHELL [39], NETTO [42] et CSA Z662 [41] sont plus conservatrices et plus sécurisés. Le choix final revient au manager pour décider la méthode qui lui convient.

IV.4. Etude numérique (MEF)

L'étude numérique contient deux parties, dans la première on a une simulation numérique par le code de calcul ANSYS APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), cette méthode de calcul est basé sur un développement par éléments finis (MEF), qui nous permet de traiter la majorité des problèmes de la mécanique dans les différentes structures.

L'objectif de cette simulation numérique est de prédire la pression limite.

Le principe de la simulation numérique est passé par quatre étapes :

- La géométrie
- Le maillage
- Conditions limites
- Résultats

Selon la base de données, on a 329 tests d'éclatement. On a choisi deux tests d'éclatements ([17] ; [24]) afin de prédire la pression limite par simulation numérique.

IV.4.1. Simulation numérique des tests d'éclatements de Netto et al. [17]

D'après Netto et al. [17], six tests d'éclatements ont été effectués sur des tubes en acier pour différentes tailles de défaut. Une vue schématique des spécimens avec des défauts induits est présentée dans la figure (VI.6.). Le diamètre extérieur moyen (D) et l'épaisseur (t) réels de chaque tube, ainsi que les principaux paramètres géométriques des défauts (d , l , c) sont indiqués dans le tableau IV.3. La longueur totale des spécimens a été maintenue autour de 420 mm ($10D$). Les défauts ont été produits sur le tube par un processus d'érosion par étincelles, avec des outils personnalisés pour chaque taille de défaut. Ils ont été réalisés de formes circulaires dans les deux directions, longitudinale et circulaire, afin d'obtenir des profondeurs maximales (d) d'environ $0,6t$, $0,7t$ et $0,8t$, des longueurs maximales (l) de $0,5D$ et D , et une largeur

maximale (c) égale à $0,31D$. La figure (IV.5.) représente le tube T3D et son défaut induit avant l'essai expérimental.

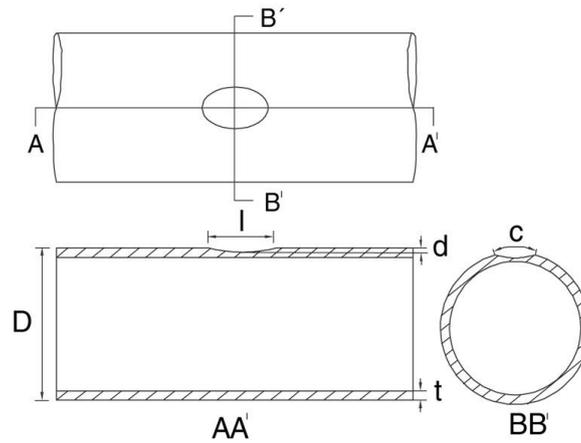


Figure IV.4 : Vue schématique des spécimens d'essai



Figure IV.5 : (a) Éprouvette avec un défaut induit. (b) Spécimens d'essai après l'éclatement.

Tableau IV.2 : Propriétés géométriques et pressions d'éclatement des tubes testés.

Tube	D (mm)	t (mm)	d (mm)	l (mm)	w (mm)	P_b (MPa)
T2D	41.94	2.73	1.58	42.00	13.00	37.02
T3D	41.92	2.73	1.59	21.00	13.00	44.65
T4D	41.95	2.73	1.87	42.00	13.00	32.47
T5D	41.95	2.73	1.91	21.00	13.00	41.28
T6D	41.95	2.73	2.13	42.00	13.00	26.76
T7D	41.95	2.73	2.24	21.00	13.00	34.55

IV.4.1.1 Etude de l'éprouvette T2D

Pour définir le comportement du matériau, on convertit la courbe conventionnelle donnée par le test de traction par une courbe rationnelle (Figure.IV.8.). L'équation de la contrainte conventionnelle est donnée par :

$$\sigma_c = f(\varepsilon_c) \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Où } \sigma_c = \frac{F}{A_0} \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{Et } \varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{IV.3})$$

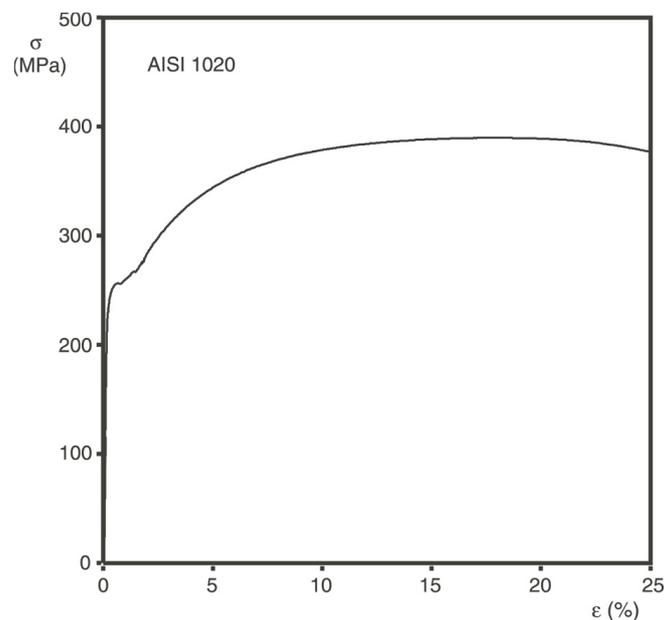


Figure.IV.6 : Courbe conventionnelle donnée par le test de traction.

Pour objectif de convertir la courbe conventionnelle par la courbe rationnelle, on utilise les deux équations suivantes :

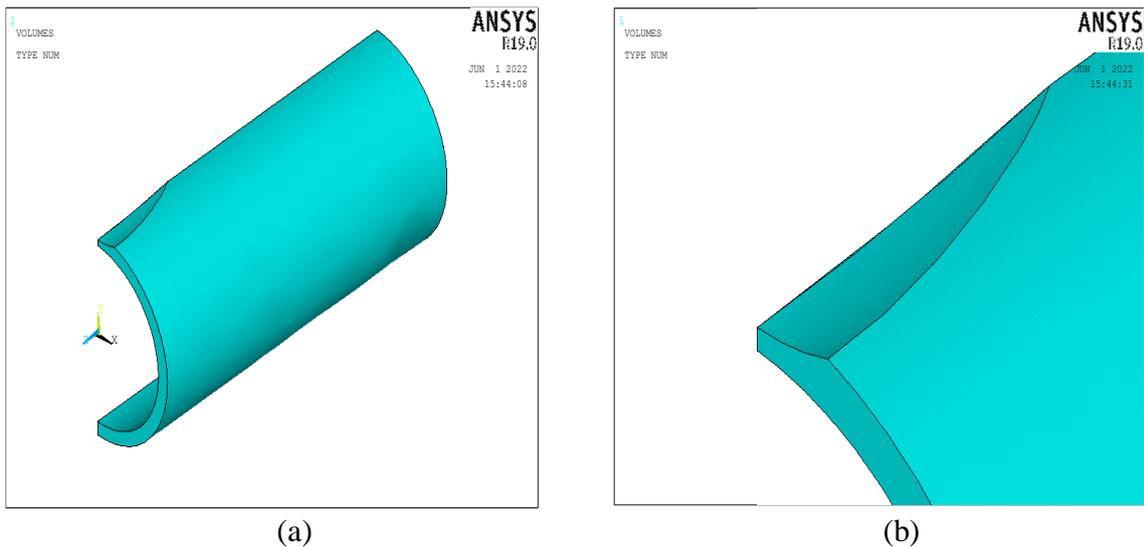
$$\sigma_r = \sigma_c \times (1 + \varepsilon_c) \quad (\text{IV.4})$$

$$\varepsilon_r = \ln(1 + \varepsilon_c) \quad (\text{IV.5})$$

Dans cette partie du chapitre, on va effectuer un calcul tridimensionnel par éléments finis à l'aide de logiciel ANSYS. On a utilisé l'éprouvette T2D afin de percevoir la distribution de la contrainte.

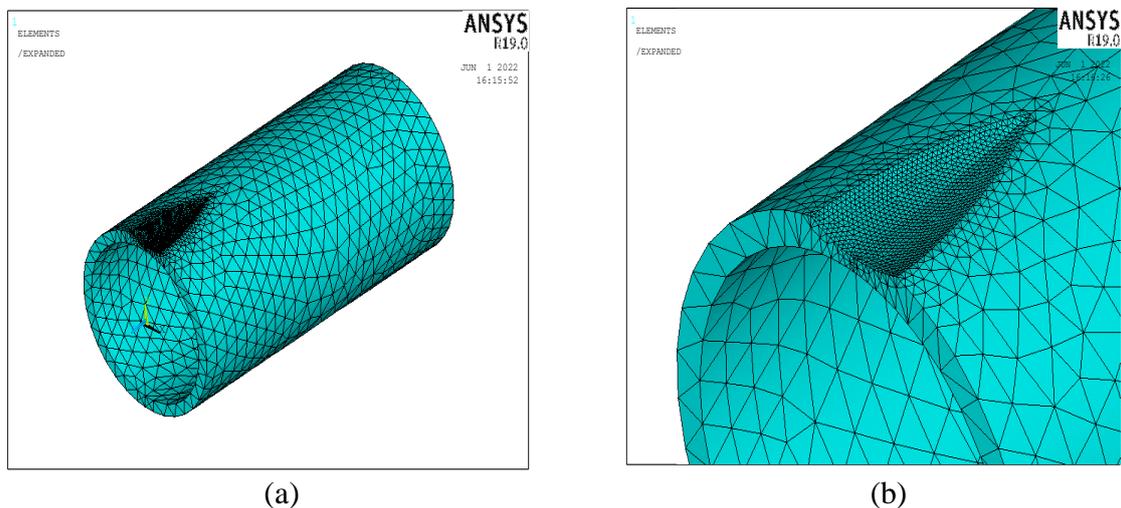
Tout d'abord on a commencé par une étude numérique de l'éprouvette T2D dont les caractéristiques sont :

Un diamètre de 41.9mm et une épaisseur de 2.73mm avec un défaut de forme elliptique d'une longueur de 42mm, d'une largeur de 13mm et d'une profondeur de 1.58mm. Nous considérons la pression d'éclatement réelle de 37.02 MPa. La figure (IV.9.) présente la géométrie de l'éprouvette T2D.

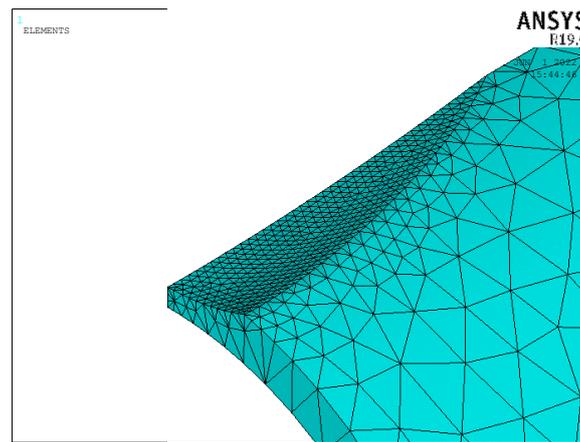


(a) (b)
Figure IV.7 : Modélisation de l'éprouvette T2D.

Ensuite, on a fait un maillage du défaut précédent qui est présenté dans la figure suivante (IV.8.).



(a) (b)



(c)

Figure IV.8 : Maillage du défaut elliptique de l'éprouvette T2D.

La figure (IV.9.) représente la variation et l'étendue de la contrainte dans le tronçon à la rupture, suite aux différentes pressions appliquées. On a varié la pression de 1 jusqu'à 37 MPa où on a obtenu une contrainte maximale de 390.29 MPa.

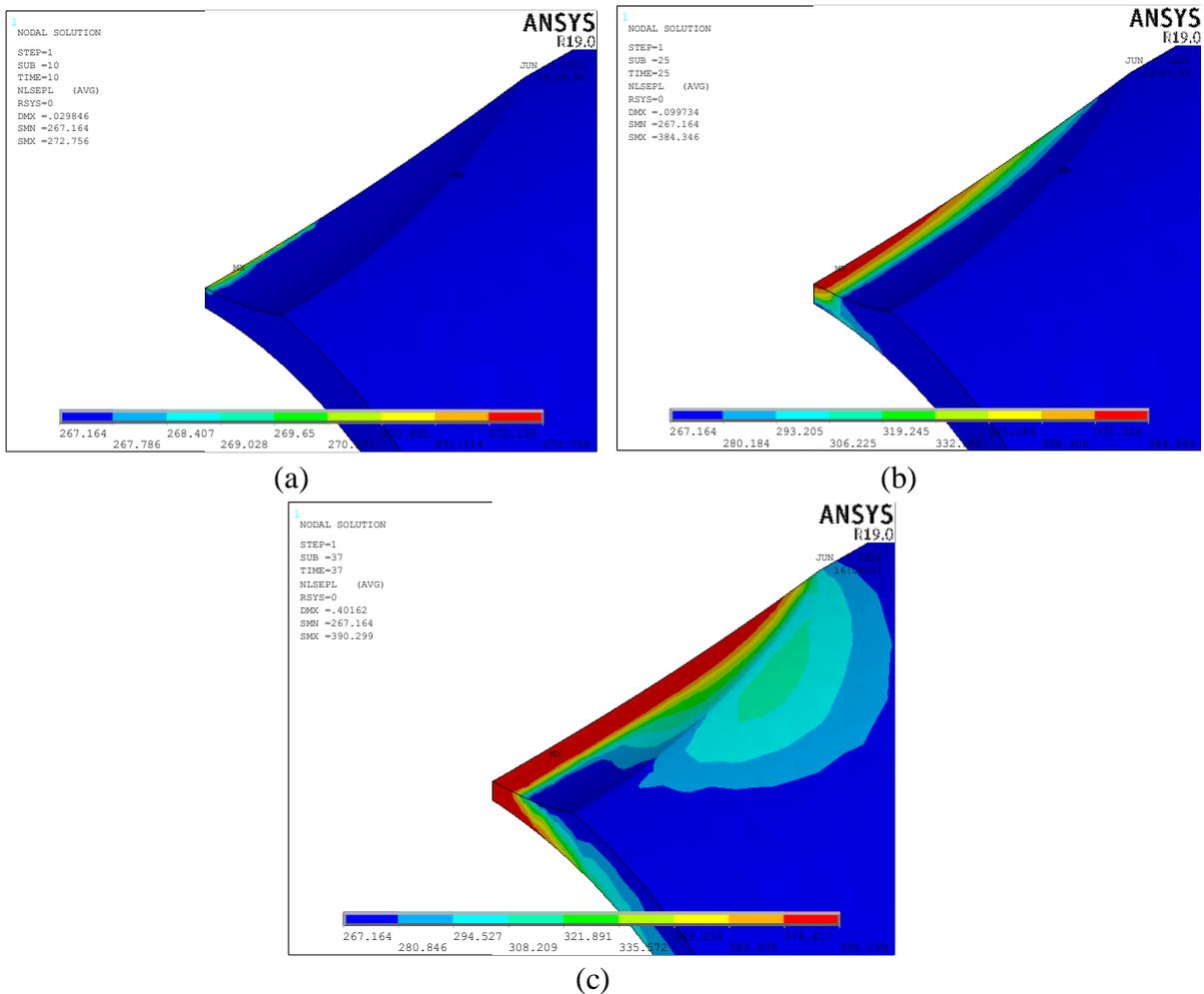


Figure IV.9 : Evolution et la répartition des contraintes à la rupture dans le tronçon lors de l'analyse numérique par éléments finis pour l'éprouvette T2D

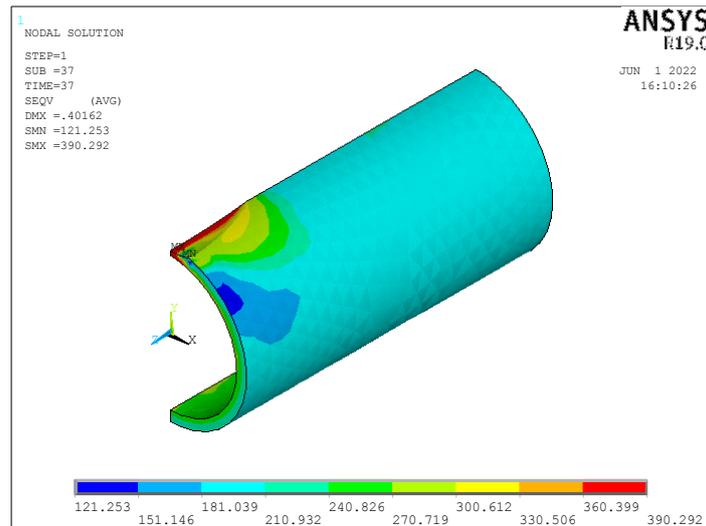


Figure IV.10 : Contours de la contrainte de Von Mises.

Pour calculer la pression limite à l’aide de cette étude numérique ,on a évalué la pression limite de 1MPa jusqu’à 37MPa et on a tracé le graphe de l’évolution de la contrainte en fonction de la pression limite (figure IV.11.) , on a trouvé la nouvelle valeur de la pression limite de service qui est égale à $P_{MEF}=36.4MPa$.

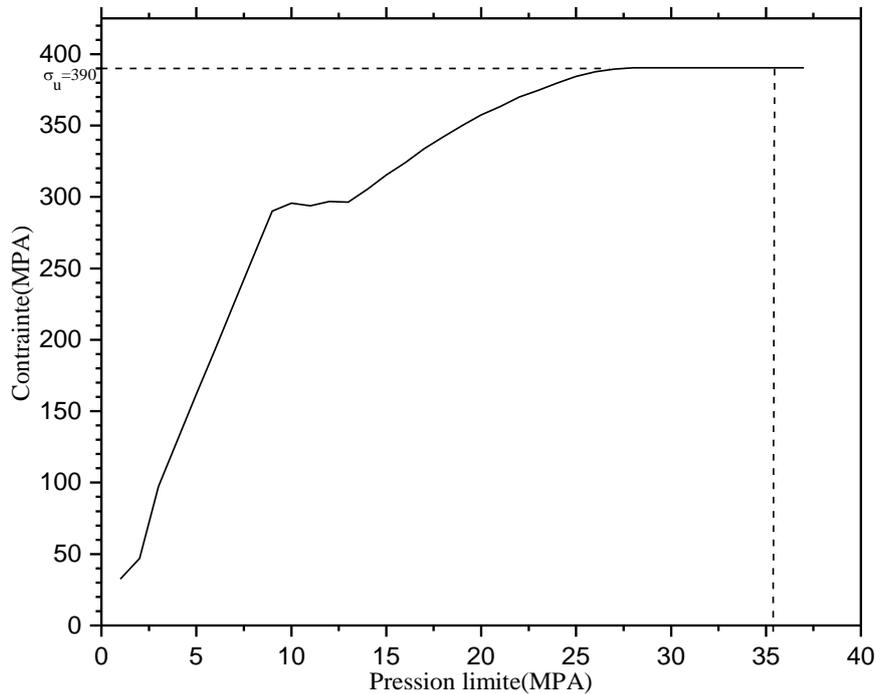


Figure IV.11 : Evolution de la contrainte en fonction de la pression limite.

Avec le même principe on a simulé le reste des éprouvette T3D, T4D, T5D, T6D et T7D.

IV.4.1.2 Etude de l'éprouvette T7D

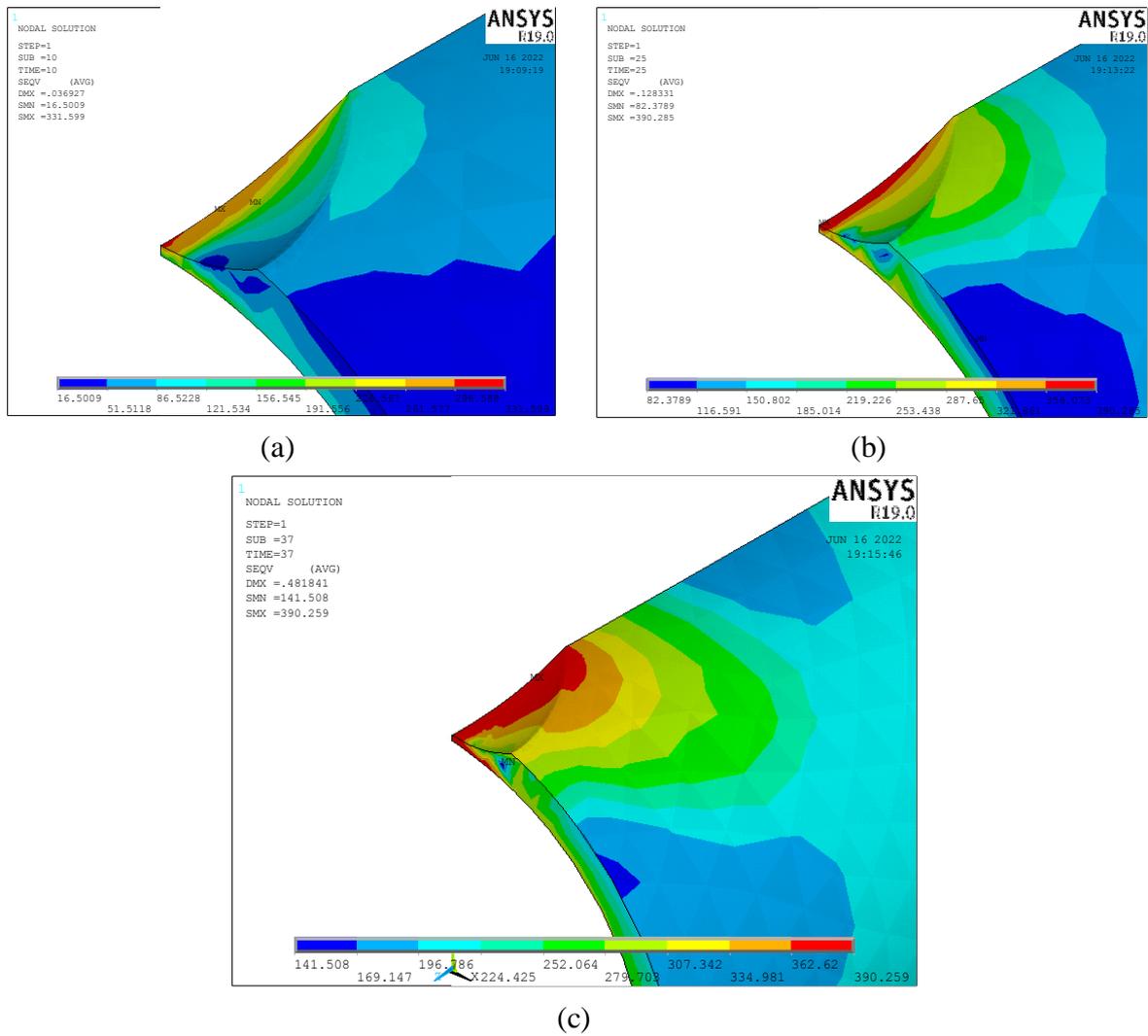


Figure IV.12 : Evolution et la répartition des contraintes dans le ligament à la rupture lors de l'analyse numérique par éléments finis pour l'éprouvette T7D.

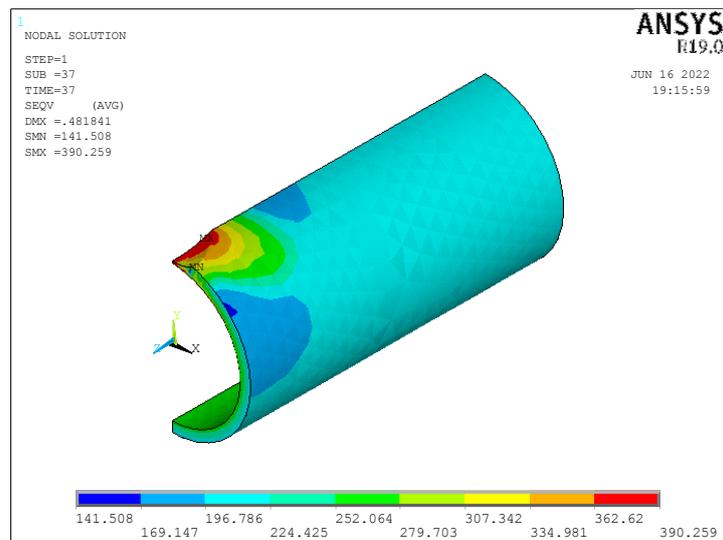


Figure IV.13 : Contours de la contrainte de Von Mises pour l'éprouvette T7D.

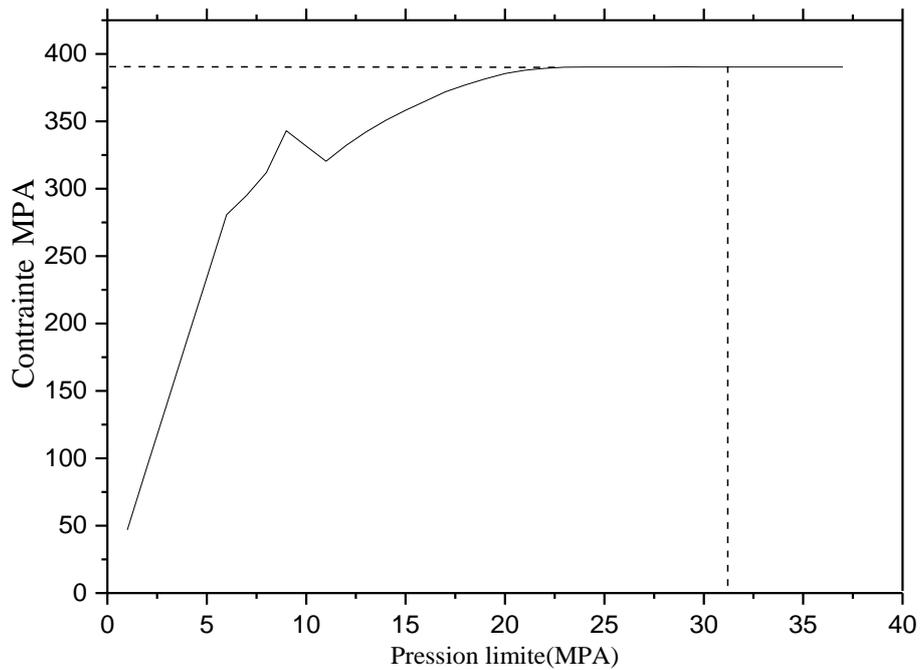


Figure IV.14 : Evolution de la contrainte en fonction de la pression limite.

Le tableau IV.3 et la figure IV.15 représente une comparaison entre les méthodes de calcul de la pression limite des codes standards et la méthodes des éléments finis des tests d'éclatement de NETTO [17] . On a remarquer que la méthode des éléments finis (MEF) a donner une meilleure precision que les autres méthodes. Par consequent l'inconvenient de cette methode réside dans la quantité des défauts et le temps de calcul de toutes les pressions limites ainsi que l'utilisation de l'outil de simulation. Les méthodes de calcul de la pression limite standard sont plus pratique dans ce cas de figure.

Tableau IV. 3 : Comparaison entre les méthodes de calcul de la pression limite des codes standards avec la méthode des éléments finis.

N° TEST	P _b (Mpa)	P _{B31G} (Mpa)	ε(%)	P _{B31Gmod} (Mpa)	ε(%)	P _{DNV} (Mpa)	ε(%)	P _{Shell92} (Mpa)	ε(%)	P _{Corrc} (Mpa)	ε(%)	P _{CSA Z662} (Mpa)	ε(%)	P _{Netto} (Mpa)	ε(%)	P _{MEF} (MPa)	ε(%)
T2D	37.02	25.96	30	22.77	38	30.28	18	22.98	38	29.20	21	21.63	42	22.92	38	36.4	02
T3D	44.65	28.64	36	26.15	41	37.58	16	26.93	40	36.46	18	27.01	40	26.42	41	44.2	01
T4D	32.47	23.47	28	19.38	40	24.04	26	17.79	45	23.47	28	17.38	46	18.32	44	28.6	12
T5D	41.28	26.22	36	22.66	45	31.06	25	21.07	49	31.44	24	23.29	44	22.52	4	37.7	09
T6D	26.76	21.15	21	16.13	40	17.76	34	12.82	52	17.41	35	12.90	52	13.81	48	22.1	17
T7D	34.55	23.47	32	18.44	47	21.96	36	13.85	60	24.12	30	17.87	48	18.09	48	31.2	10

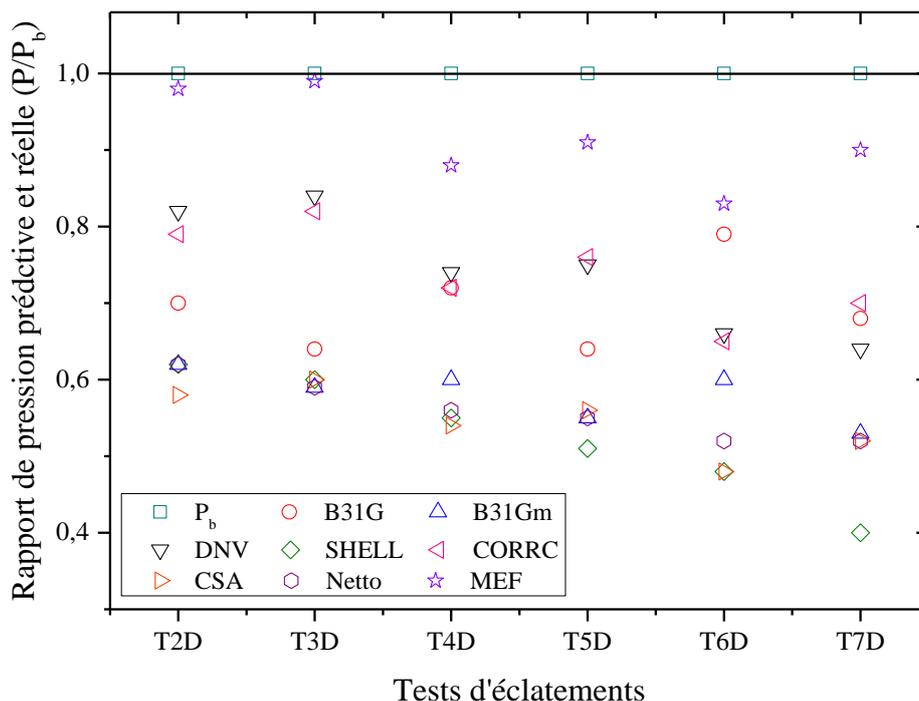


Figure IV.15 : Variation du rapport de pression calculée par les méthodes standards et la méthode des éléments finis.

IV.4.2. Simulation numérique du test d'éclatements de Benjamin et al. [24]

D'après Benjamin et al. [24], ils ont fait des tests d'éclatements sur un pipeline soumis à une longue corrosion externe. Ils ont parlés des spécimens tubulaires testés et l'instrumentation utilisée. Les pressions d'éclatement mesurées sont comparées à celles prédites par les méthodes ASME B31G, RSTRENG 085dL et DNV RP-F101.

IV.4.2.1 Test expérimental d'éclatement

Ce test représente un test d'éclatement d'un pipe en API 5L X60 de longueur total de 6m avec un diamètre de 323.9 mm, une épaisseur de 9.8 mm, le défaut est rectangulaire de longueur 255.6 mm, une largeur de 27.2 mm et 2.72 de profondeur. La figure IV.5 représente le défaut après test d'éclatement.

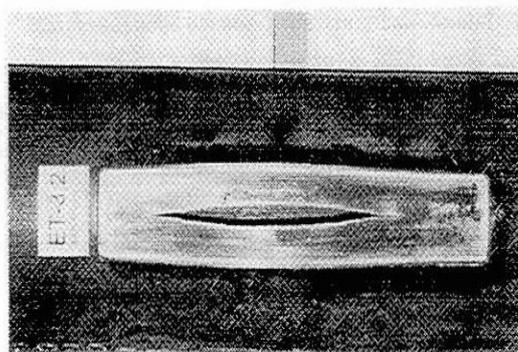


Figure IV.16 Défaut après test d'éclatement.

IV.4.2.2 Simulation numérique

Dans cette partie nous avons fait une simulation numérique à l'aide du logiciel ANSYS Workbench. On a commencé par représenter la géométrie du tronçon et le défaut rectangulaire ensuite nous avons généré un maillage comme le montrent les figures suivantes.

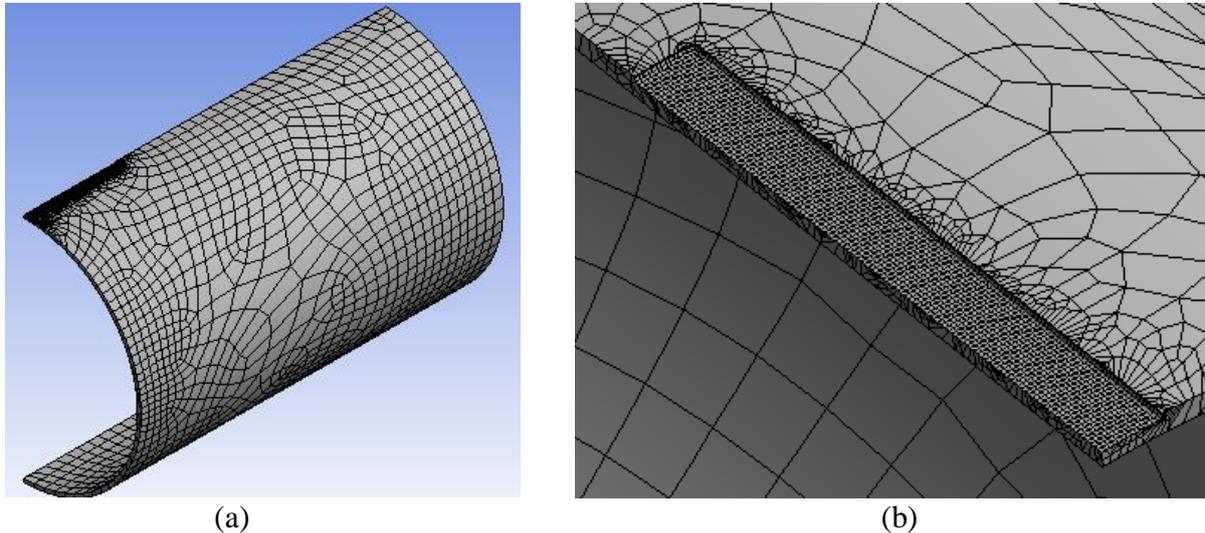


Figure IV.17 : Représentation de la géométrie et du maillage du tronçon, (a). le maillage complet du tronçon, (b) représentation du maillage du défaut rectangulaire.

Ensuite on a appliqué une pression interne à notre tronçon, on l'a varié de 1 jusqu'à 12Mpa pour évaluer la pression limite à l'aide de l'étude numérique. Une fois les résultats obtenus nous avons tracé le graph de l'évolution de la contrainte en fonction de la pression limite comme nous l'avons fait avant, comme le montre la figure suivante.

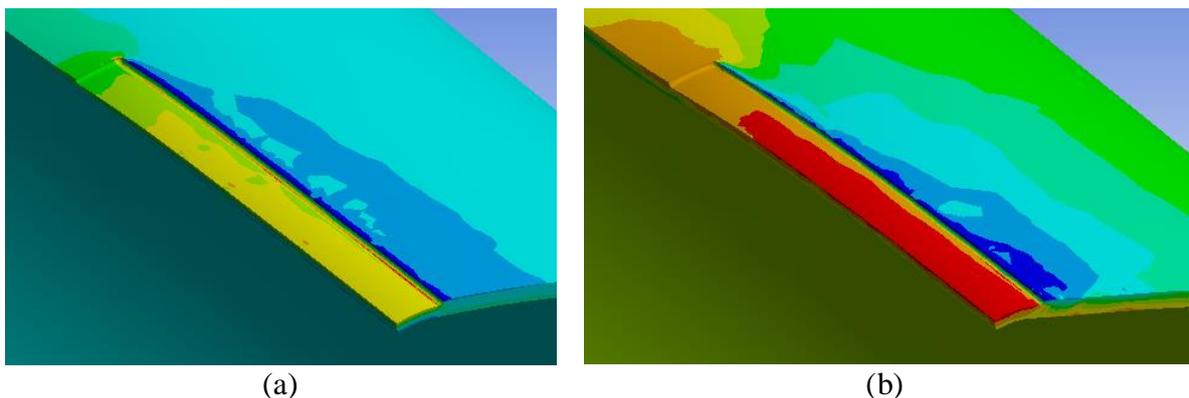


Figure IV.18 : Evolution et la répartition des contraintes à la rupture dans le tronçon lors de l'analyse numérique par éléments finis, (a) la contrainte obtenue suite à 5 Mpa, (b) la contrainte obtenue suite à 12 Mpa

Le tableau IV.4 et la figure IV.19 représente une comparaison entre les méthodes de calcul de la pression limite des codes standards et la méthodes des éléments finis du test d'éclatement de Benjamin et al. [24] . On a remarquer que la méthode des éléments finis (MEF) a donner une meilleure precision que les autres méthodes. Par consequent l'inconvenient de cette methode réside dans la quantité des défauts et le temps de calcul de toutes les pressions limites ainsi que l'utilisation de l'outil de simulation. Les méthodes de calcul de la pression limite standard sont plus pratique dans ce genre de cas.

Tableau IV.4 : Comparaison entre les méthodes de calcul de la pression limite des codes standards avec la méthode des éléments finis pour le test de X60.

Nuance	P_b (Mpa)	P_{B31G} (Mpa)	$\varepsilon(\%)$	$P_{B31Gmod}$ (Mpa)	$\varepsilon(\%)$	P_{DNV} (Mpa)	$\varepsilon(\%)$	$P_{Shell92}$ (Mpa)	$\varepsilon(\%)$	P_{Corrc} (Mpa)	$\varepsilon(\%)$	$P_{CSA\ Z662}$ (Mpa)	$\varepsilon(\%)$	P_{Netto} (Mpa)	$\varepsilon(\%)$	P_{MEF} (MPA)	$\varepsilon(\%)$
X60	14.4	21.73	51	24.63	71	27.21	89	22.83	59	26.47	84	24.28	69	26.76	89	12.12	16

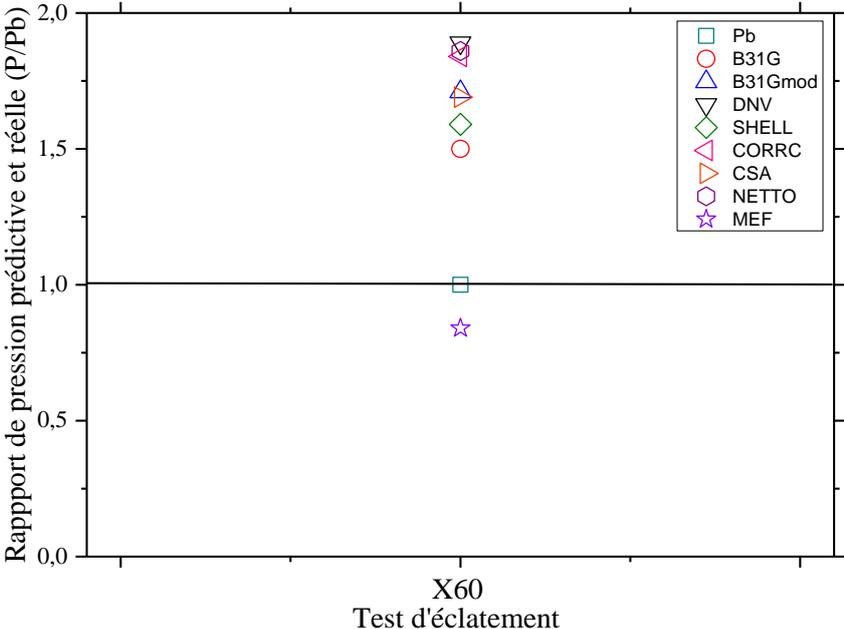


Figure IV.19 : Variation du rapport de pression calculée par les méthodes standards et la méthode des éléments finis.

Conclusion

Conclusion et perspectives

Le transport par canalisation joue un rôle primordial dans le développement de l'économie de notre pays. Travailler pour aider à augmenter la production serait prendre une part de ce développement.

En raison de l'augmentation de la demande mondiale de gaz et de pétrole, l'Algérie s'emploie à augmenter la productivité des hydrocarbures en augmentant le flux d'approvisionnement. Aujourd'hui, Sonatrach utilise 24 000 kilomètres de canalisations pour transporter le gaz et le pétrole. Au fil du temps, ces tuyaux courent le risque d'éclater en raison de la corrosion à l'intérieur et/ou à l'extérieur de la canalisation. Pour cela, un contrôle doit être effectué pour décider s'il faut réparer ou non. C'est dans cet objectif que s'inscrit notre travail, proposer des méthodes de calculs de la pression limite afin d'augmenter encore plus la production tout en prenant compte de la sécurité, et cela dans le cas où la réparation n'est pas nécessaire.

On a commencé notre travail par la constitution d'une base de données qui regroupe 329 tests d'éclatements publiés en littérature, ce qui nous a aidé à comparer les différentes méthodes de calcul de la pression limite (DNV RP F-101 [38], SHELL [39], P-CORRC [40], NETTO [42] et CSA Z662 [41] avec les méthodes qu'utilise SONATRACH (ASME B31G [37] et ASME B31G_{mod}[37]).

Ensuite notre travail s'est orienté vers l'étude numérique avec la méthode des éléments finis afin de prédire la pression limite, d'après les résultats trouvés on a constaté les points suivants :

- Les 3 méthodes les plus sécurisées sont CSA Z-662, SHELL et B31G, par contre les méthodes DNV RP F-101 et P-CORRC représentent respectivement les méthodes les plus dangereuses.
- Les deux codes ASME B31G (2009) et ASME B31G_{mod} (2012) utilisés par SONATRACH favorisent beaucoup plus la sûreté que la production.
- Les deux méthodes DNV RP F-101 et P-CORRC sont les deux méthodes de calcul de la pression limite qui favorisent beaucoup plus la production.
- Le degré de danger de la DNV RP F-101 est très élevé.
- Les méthodes ASME B31G, ASME B31G_{mod}, SHELL, NETTO et CSA Z662 sont plus conservatrices et plus sécurisées.

- La méthode des éléments finis (MEF) montre une meilleure précision pour le calcul de la pression limite.
- De point de vue pratique, l'utilisation de la MEF pour la prédiction de la pression limite, n'est pas pratique en termes de quantité de défauts, temps de calcul et difficulté d'utilisation de l'outil de simulation.
- L'utilisation des codes et standards (équation empirique) permettent à l'ingénieur d'utiliser facilement ces méthodes de calcul pour prédire la pression limite ; on prend en considération le choix du code approprié pour divers condition de fonctionnement (nuance, taille de défaut...).

Comme perspective, nous pensons à développer un code de calcul de la pression limite propre à SONARACH, et cela en se basant sur une base de donnée des tests d'éclatement de la gamme de pipeline la plus utilisée au niveau de SONATRACH.

Annexe A

Annexe A

Annexe A

Tests d'éclatements

N° Article	N° Test	Matériaux	D (mm)	t (mm)	E (MPa)	R _e (Mpa)	R _m (Mpa)	Type de défaut	d (mm)	L (mm)	W (mm)	P _b (Mpa)	P _{B31G} (Mpa)	P _{B31Gm od} (Mpa)	P _{DNV} (Mpa)	P _{Shell92} (Mpa)	P _{Corrc} (Mpa)	P _{CSA Z662} (Mpa)	P _{Netto} (Mpa)
[1]	1	X60	508	8.88	2.10 ⁵	478	636	B	4.44	35	35	19.54	17.56	17.4	21.76	18.28	20.55	16.99	16.41
	2	X60	508	8.88	2.10 ⁵	478	636	C	4.44	34.1	34.1	19.97	17.59	17.45	21.80	18.35	20.59	17.02	16.44
	3	X60	508	9.65	2.10 ⁵	456	645	C	4.825	35.5	35.5	19.05	19.12	18.96	23.73	19.95	22.38	18.50	17.83
	4	X60	508	9.61	2.10 ⁵	456	645	C	4.805	35.4	35.4	19.35	18.16	18.02	23.97	20.15	22.60	17.58	16.94
	5	X60	508	9.54	2.10 ⁵	456	645	B	4.77	35	35	19.03	18.04	17.90	23.80	20.03	22.45	17.46	16.82
	6	X60	508	9.54	2.10 ⁵	456	645	B	4.77	35	35	19.61	18.04	17.90	23.80	20.03	22.45	17.46	16.82
	7	X60	508	9.44	2.10 ⁵	456	645	B	4.72	35	35	19.32	17.84	17.70	23.54	19.80	22.21	17.27	16.65
	8	X60	508	9.58	2.10 ⁵	456	645	B	4.79	35	35	19.50	18.12	17.98	23.91	20.12	22.55	17.53	16.89
	9	X60	508	9.55	2.10 ⁵	456	645	C	4.775	35.3	35.3	19.62	18.05	17.90	23.82	20.02	22.46	17.47	16.83
	10	X60	508	9.52	2.10 ⁵	456	645	C	4.76	35.2	35.2	19.38	17.99	17.85	23.74	19.97	22.39	17.41	16.78
	11	X60	508	10.6	2.10 ⁵	506	678	C	5.3	37.1	35.1	24.67	20.04	19.88	26.49	22.23	24.94	19.39	18.64
	12	X60	508	10.7	2.10 ⁵	506	678	C	5.35	37.2	37.2	24.17	22.45	22.27	28.12	23.60	26.46	21.72	20.88
	13	X60	508	10.7	2.10 ⁵	506	678	C	5.35	37.2	37.2	25	22.45	22.27	28.12	23.60	24.46	21.72	20.88
	14	X60	508	10.65	2.10 ⁵	506	678	C	5.325	37.2	37.2	24.32	22.34	22.16	27.98	23.48	26.34	21.62	20.78
	15	X60	508	10.6	2.10 ⁵	506	678	B	5.3	35	35	23.94	22.33	22.17	27.96	23.56	26.32	21.61	20.74
	16	X60	508	10.7	2.10 ⁵	506	678	B	5.35	35	35	23.84	22.55	22.38	28.23	23.80	26.58	21.82	20.94
	17	X60	508	10.7	2.10 ⁵	506	678	B	5.35	35.1	35.1	24.10	22.54	22.38	28.23	23.79	26.57	21.81	20.94
	18	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	607	C	4.85	35.5	33.9	19.55	20.35	20.18	25.44	21.39	23.99	19.69	18.97

Annexe A

	19	X52	508	9.85	2.10 ⁵	372	607	C	4.925	35	35	19.11	15.21	15.09	23.17	19.50	21.84	14.72	14.17
	20	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	607	C	4.85	35.5	35.5	19.59	14.96	14.84	22.77	19.15	21.47	14.47	13.94
	21	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	607	C	4.85	35.5	33.6	19.65	14.9	14.84	22.77	19.15	21.47	14.47	13.94
	22	X52	508	9.75	2.10 ⁵	372	607	C	4.875	35.8	33.6	20.08	15.03	14.90	22.88	19.23	21.58	14.54	14.01
	23	X52	508	9.8	2.10 ⁵	372	607	C	4.9	35.4	33.6	20.27	15.12	15	23.03	19.37	21.71	14.63	14.09
	24	X52	508	9.86	2.10 ⁵	372	607	B	4.9	35	35	18.42	15.23	15.12	23.20	19.54	21.88	14.75	14.20
	25	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	607	B	4.85	35	34.9	18.77	14.97	14.85	22.80	19.18	21.50	14.49	13.95
	26	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	607	B	4.85	35	35	19.28	14.97	14.85	22.80	19.18	21.50	14.49	13.95
	27	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	607	B	4.85	35	35	19.91	14.97	14.85	22.80	19.18	21.50	14.49	13.95
	28	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	607	B	4.85	35	35	19.73	14.97	14.85	22.80	19.18	21.50	14.49	13.95
	29	X52	508	9.8	2.10 ⁵	372	607	B	4.9	35	35	19.55	15.13	15.01	23.04	19.40	21.73	14.64	14.10
	30	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	607	C	4.85	35.5	33.7	20.68	14.96	14.84	22.77	19.15	21.47	14.47	13.94
	31	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	607	C	4.85	35.5	33.8	19.67	14.96	14.84	22.77	19.15	21.47	14.47	13.94
[2]	32	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448	680	B	14	200	50	17.15	14.86	12.12	15.07	9.91	16.82	12.19	13.88
[3]	33	X46	304.8	6.35	2.10 ⁵	35	543	B	4.95	26	20	15.36	14.25	13.53	19.62	14.42	18.32	12.99	12.24
	34	X46	304.8	6.35	2.10 ⁵	382	570	B	4.25	33	21	16.29	15.40	14.77	20.97	15.89	19.75	14.56	13.93
	35	X46	304.8	6.35	2.10 ⁵	351	463	B	4.64	37	30	14.29	13.51	12.62	15.68	11.21	15.03	12.53	12.13
	36	X46	324	6.01	2.10 ⁵	382	570	B	3.6	19.35	18.99	16.22	14.90	14.74	20.66	17.24	19.34	14.25	13.49
	37	X52	324	10.3	2.10 ⁵	380	514	B	5.15	243	154.5	23.20	19.37	17.52	20.99	16.86	20.70	16.83	19.20
	38	X52	324	10.3	2.10 ⁵	380	514	B	5.15	243	30.9	22	19.37	17.52	20.99	16.86	20.70	16.83	19.20
	39	X60	508	6.6	2.10 ⁵	443.4	598.9	B	2.62	381	25.4	11.24 5	7.64	9.05	10.61	9.04	10.32	8.40	10.24
	40	X60	508	6.35	2.10 ⁵	429.6	672.5	B	3.429	900	25.4	8	5.43	6.66	8.33	7.23	7.78	5.47	6.58
	41	X60	508	6.35	2.10 ⁵	434.8	672.5	B	3.175	1000	25.4	8.4	5.97	7.10	8.96	7.81	8.43	6	7.07

Annexe A

	42	X60	508	6.7	2.10 ⁵	430	601	B	2.66	1016	25.4	11.55	7.52	8.47	10.10	8.83	7.60	7.56	8.93
	43	X60	323.9	9.8	2.10 ⁵	422.5	589.6	B	6.95	255.6	95.3	14.40 1	8.17	13.46	14.47	11.23	14.28	11.25	14.19
	44	X60	323.9	9.71	2.10 ⁵	422.5	589.6	B	6.85	350	95.3	13.57 7	8.20	12.86	13.33	10.69	12.35	9.73	12.34
	45	X60	323.9	9.91	2.10 ⁵	422.5	589.6	B	7.08	433.4	95.3	12.12 5	8.12	12.65	12.70	10.33	11.37	8.96	10.83
	46	X60	323.9	9.74	2.10 ⁵	422.5	589.6	B	7.06	527.8	95.3	11.30 1	7.69	11.92	11.64	9.0	10.23	8.07	8.79
[4]	47	Grade 20	219	6	2.10 ⁵	305		B	2.4	133	102	13.8	14.61	13.70	28.71	23.43	28.37	13.59	15.10
[5]	48	X60	1067	12.7	2.10 ⁵	415	678	B	9.6	58	22	9	9.98	9.65	14.67	11.44	13.69	9.21	8.82
[6]	49	X52	274	10.87	2.10 ⁵	377.7	513.4	B	4	200	100	32.6	26.79	25.32	31.98	25.94	31.13	25.19	27.42
	50	X52	274	12.11	2.10 ⁵	377.7	513.4	B	6	200	100	29.4	27.36	24.95	31.01	24.28	30.49	24.67	26.79
[7]	51	X100	914.4	13	2.10 ⁵	800	877	B	3.25	500	40	20.8	18.76	20.95	20.87	17.88	20.62	20.69	23
	52	X100	914.4	13	2.10 ⁵	800	877	B	6.5	500	40	13.6	12.51	16.33	15.46	12.72	15.42	15.47	18.90
	53	X100	914.4	13	2.10 ⁵	800	877	B	9.75	500	40	6.5	6.25	11.04	8.70	6.81	8.67	8.70	13.31
[8]	54	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448	680	B	4.4	200	50	24.11	20.72	20.37	29.21	24.35	28.41	20.59	21.26
	55	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448	680	B	8.8	200	50	21.76	18.39	17.35	24.90	19.19	24.63	17.85	18.47
	56	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448	680	B	13.1	200	50	17.15	15.54	13.20	17.42	11.88	18.71	13.56	14.76
	57	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448	680	B	8.8	100	50	24.3	20.47	20.02	29.05	23.17	27.48	19.91	19.47
	58	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448	680	B	8.8	300	50	19.8	17.34	15.99	22.25	17.43	22.45	16.27	17.73
	59	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448	680	B	8.8	200	100	23.42	18.39	17.35	24.90	19.19	24.63	17.85	18.47
	60	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448	680	B	8.8	200	200	22.64	18.39	17.35	24.90	19.19	24.63	17.85	18.47
[9]	61	X60	324	9.79	2.10 ⁵	452	542		6.99	500	95.3	11.99	8.59	13.18	11.25	9,25	9,95	9.13	10.37
	62	X60	324	9.74	2.10 ⁵	452	542		7.14	528	95.3	11.3	7.97	12.54	10.39	8,56	9,11	8.36	9.03
	63	X60	324	9.8	2.10 ⁵	452	542		7.08	256	95.3	14.4	8.34	14.04	12.77	9,89	12,59	11.55	14.72

Annexe A

	64	X60	324	9.66	2.10 ⁵	452	542		6.76	306	95.3	14.07	8.90	14.05	12.79	10,15	12,16	11.16	14.20
	65	X60	324	9.71	2.10 ⁵	452	542		6.93	350	95.3	13.58	8.53	13.54	11.94	9,57	11,04	10.12	12.89
	66	X60	324	9.71	2.10 ⁵	452	542		6.91	395	95.3	12.84	8.59	13.44	11.71	9,48	10,62	9.74	12.14
	67	X60	324	9.91	2.10 ⁵	452	542		7.31	433	95.3	12.13	7.97	12.91	10.79	8,76	9,58	8.79	10.61
	68	X60	324	9.94	2.10 ⁵	452	542		7.22	467	95.3	11.92	8.34	13.15	11.10	9,07	9,83	9.02	10.53
	69	X60	324	9.79	2.10 ⁵	452	542		6.99	484	95.3	11.91	8.59	13.22	11.31	9,28	10,02	9.19	10.63
	70	X60	508	14.3	2.10 ⁵	478	600		10.3	500	97	13.4	8.28	13.37	12.32	9,82	11,52	10.09	13.18
	71	X60	508	14.8	2.10 ⁵	478	600		9.7	500	97	15.8	10.55	15.61	15.41	12,38	14,63	12.82	16.02
	72	X60	508	14.6	2.10 ⁵	478	600		10.35	500	97	14.6	8.79	13.97	13.07	10,42	12,28	10.76	13.88
	73	X80	459	8	2.10 ⁵	589	731		3.75	40	32	24.2	21.24	21	24.60	20,41	23,30	20.5	20.19
	74	X80	457	8.10	2.10 ⁵	601	684		5.39	39.6	32	22.7	21.14	20.47	22.05	17,16	20,67	19.98	19.10
	75	X46	76.2	2	2.10 ⁵	391	458		1.4	75	16	9.4	6.77	10.56	9.24	7,42	8,64	8.11	10.61
	76	X42	76.2	2.04	2.10 ⁵	260	309		1.44	75	16	5.45	4.50	7.09	6.26	5,02	5,86	5.42	7.09
[10]	77	X60	508	14,3	2.10 ⁵	413	627	B	10	500	95.3	14.6	7.69	12.03	13.73	10.98	12.90	9.35	12.04
	78	X60	508	14,3	2.10 ⁵	413	617	B	10	500	95.3	15.8	7.69	12.03	13.51	10.81	12.70	9.35	12.04
	79	X60	508	14.3	2.10 ⁵	413	600	B	10	500	95.3	13.4	7.69	12.03	13.14	10.51	12.35	9.35	12.04
[11]	80	X80	459	8,1	2.10 ⁵	646	738	C	5,28	40,3	147	25,25	22.65	21.97	23.77	18.57	22.30	21.48	20.57
	81	X80	459	8,1	2.10 ⁵	646	738	C	5,62	40	296	23,29	22.42	21.59	23.30	17.85	21.86	21.05	20.11
	82	X80	459	8,1	2.10 ⁵	646	738	C	6,01	40	445	20,51	22.10	21.04	22.57	16.77	21.22	20.44	19.54
	83	X80	459	8,1	2.10 ⁵	646	738	B	2,36	208	32,1	22,73	21.50	20.69	21.74	18.26	21.54	20.74	22.68
	84	X80	459	8,1	2.10 ⁵	646	738	B	4,05	208	32,1	17,36	18.65	17	17.28	13.87	17.48	16.83	19.39
	85	X80	459	8,1	2.10 ⁵	646	738	B	5,69	208	32,1	9,94	15.61	12.84	11.72	8.92	12.31	11.85	15.28
[12]	86	X65	762	17,5	2.10 ⁵	495	649	B	8,75	50	50	27.5	24.19	24.04	29.68	25.12	27.91	23.42	22.39

Annexe A

	87	X65	762	17,5	2.10 ⁵	495	649	B	8,75	100	50	24.3	22.63	22.14	27.75	22.16	26.26	22.03	21.55
	88	X65	762	17,5	2.10 ⁵	495	649	B	8,75	200	50	21.8	20.35	19.21	23.83	18.39	23.55	19.76	20.45
	89	X65	762	17,5	2.10 ⁵	495	649	B	8,75	300	50	19.8	19.20	17.72	21.31	16.70	21.49	18.03	19.64
	90	X65	762	17,5	2.10 ⁵	495	649	B	8,75	600	50	16.5	12.50	16.12	18.23	14.98	17.82	14.95	17.93
	91	X65	762	17,5	2.10 ⁵	495	649	B	8,75	900	50	15	12.50	15.64	17.18	14.43	16.19	13.58	16.68
[13]	92	X42	273,7	5,24	2.10 ⁵	380	528.5		2,04	1000	-	15,34	9.77	10.84	12.94	11.30	12.36	9.77	10.40
	93	X42	273,8	5,3	2.10 ⁵	380	528.5		2,52	1000	-	15,53	8.48	9.79	11.31	9.85	10.73	8.49	8.38
[14]	94	X70	762	15,9	2.10 ⁵	532,2	626,8	B	3,98	50	-	29.5	24.07	24.04	26.44	22.97	25.43	23.75	23.58
	95	X70	762	15,9	2.10 ⁵	532,2	626,8	B	5.96	100	-	26	22.73	22.45	25.09	20.74	23.94	22.36	22.30
	96	X70	762	15,9	2.10 ⁵	532,2	626,8	B	7.95	150	-	22.5	20.65	19.77	22.20	17.22	21.60	20.17	20.46
	97	X70	762	15,9	2.10 ⁵	532,2	626,8	B	9.94	200	-	17.5	18.23	16.47	17.86	13.10	18.26	17.06	18.06
	98	X70	762	15,9	2.10 ⁵	532,2	626,8	B	11.93	300	-	12.5	15.07	12.16	11.36	8.20	12.37	11.56	14.40
	99	X70	762	15,9	2.10 ⁵	532,2	626,8	B	13.91	500	-	5	3.05	7.93	4.92	3.72	4.59	4.29	8.70
[15]	100	X42	76.2	2.04	2.10 ⁵	260	309	B	1.44	75	-	5.45	4.50	7.09	6.26	5.02	5.86	5.42	7.09
	101	X46	76.2	2	2.10 ⁵	391	458	B	1.4	75	-	9.4	6.77	10.56	9.24	7.42	8.64	8.11	10.61
	102	X52	274	10.87	2.10 ⁵	377.7	513.4	B	4	200	-	32.65	26.79	25.32	31.98	25.94	31.13	25.19	27.42
	103	X52	274	11.94	2.10 ⁵	377.7	513.4	B	9	200	-	15.82	21.26	16.76	17.57	12.85	18.07	14.62	17.04
	104	X52	508	5.7	2.10 ⁵	435	631	B	1.25	200	-	12.76	9.57	9.31	12.35	10.61	12.27	9.30	10.12
	105	X52	508	5.7	2.10 ⁵	435	631	B	2.57	200	-	9.59	8.22	7.59	9.78	8.03	9.87	7.48	8.78
	106	X52	508	5.7	2.10 ⁵	435	631	B	3.48	200	-	7.58	7.21	6.24	7.59	6.01	7.81	5.92	7.56
	107	X52	508	5.7	2.10 ⁵	435	631	B	3.76	200	-	6.63	6.88	5.79	6.83	5.35	7.08	5.37	7.15
	108	X52	508	5.7	2.10 ⁵	435	631	B	3.99	200	-	6.12	6.61	5.42	6.17	4.78	6.44	4.88	6.79
	109	X52	274	12.11	2.10 ⁵	377.7	513.4	B	6	200	-	29.49	27.36	24.95	31.01	24.28	30.49	24.67	26.79
	110	X60	324	9.8	2.10 ⁵	452	542	B	7.08	256	-	14.4	8.34	14.04	12.77	9.89	12.59	11.55	14.72

Annexe A

111	X60	324	9.66	2.10 ⁵	452	542	B	6.76	306	-	14.07	8.90	14.05	12.79	10.15	12.16	11.16	14.20
112	X60	324	9.79	2.10 ⁵	452	542	B	6.99	500	-	11.99	8.59	13.18	11.25	9.25	9.95	9.13	10.37
113	X60	324	9.74	2.10 ⁵	452	542	B	7.14	528	-	11.3	7.97	12.54	10.39	8.56	9.11	8.36	9.03
114	X60	508	14.8	2.10 ⁵	478	600	B	9.7	500	-	15.8	10.55	15.61	15.41	12.38	14.63	12.82	16.02
115	X60	508	14.6	2.10 ⁵	478	600	B	10.35	500	-	14.6	8.79	13.97	13.07	10.42	12.28	10.76	13.88
116	X60	508	14.3	2.10 ⁵	478	600	B	10.3	500	-	13.4	8.28	13.37	12.32	9.82	11.52	10.09	13.18
117	X60	324	9.71	2.10 ⁵	452	542	B	6.93	350	-	13.58	8.53	13.54	11.94	9.57	11.04	10.12	12.89
118	X60	324	9.71	2.10 ⁵	452	542	B	6.91	395	-	12.84	8.59	13.44	11.71	9.48	10.62	9.74	12.14
119	X60	324	9.91	2.10 ⁵	452	542	B	7.31	433	-	1.13	7.97	12.91	10.79	8.76	9.58	8.79	10.61
120	X60	324	9.94	2.10 ⁵	452	542	B	7.22	467	-	11.92	8.34	13.15	11.10	9.07	9.83	9.02	10.53
121	X60	324	9.79	2.10 ⁵	452	542	B	6.99	484	-	11.91	8.59	13.22	11.31	9.28	10.02	9.19	10.63
122	X65	762	17.5	2.10 ⁵	495	564.3	B	8.75	50	-	27.5	24.19	24.04	25.80	21.84	24.27	23.42	22.39
123	X65	762	17.5	2.10 ⁵	496	565.4	B	8.75	100	-	24.3	22.68	22.19	24.18	19.31	22.87	22.07	21.59
124	X65	762	17.5	2.10 ⁵	450	574.8	B	4.4	200	-	24.11	20.81	20.46	24.69	20.58	24.01	20.68	21.35
125	X65	762	17.5	2.10 ⁵	450	574.8	B	8.8	100	-	24.3	20.56	20.11	24.55	19.59	23.23	20.01	19.56
126	X65	762	17.5	2.10 ⁵	450	574.8	B	8.8	200	-	23.42	18.47	17.42	21.05	16.22	20.82	17.92	18.55
127	X65	762	17.5	2.10 ⁵	450	574.8	B	8.8	200	-	22.64	18.47	17.42	21.05	16.22	20.82	17.92	18.55
128	X65	762	17.5	2.10 ⁵	450	574.8	B	8.8	200	-	21.76	18.47	17.42	21.05	16.22	20.82	17.92	18.55
129	X65	762	17.5	2.10 ⁵	497	566.6	B	8.75	200	-	21.8	20.43	19.29	20.80	16.05	20.56	19.84	20.53
130	X65	762	17.5	2.10 ⁵	450	574.8	B	8.8	300	-	19.8	17.42	16.06	18.81	14.73	18.98	16.34	17.81
131	X65	762	17.5	2.10 ⁵	498	567.7	B	8.75	300	-	19.8	19.32	17.82	18.64	14.61	18.80	18.14	19.76
132	X65	762	17.5	2.10 ⁵	499	568.9	B	8.75	600	-	16.5	12.60	16.25	15.98	13.13	15.62	15.07	18.08
133	X65	762	17.5	2.10 ⁵	450	574.8	B	13.10	200	-	17.15	15.61	13.26	14.73	10.04	15.81	13.62	14.83
134	X65	762	17.5	2.10 ⁵	500	570	B	8.75	900	-	15	12.63	15.80	15.09	12.67	14.22	13.72	16.85

Annexe A

	135	X70	457.2	7.9	2.10 ⁵	639	732	B	3.2	60	-	26.6	22.20	21.82	23.70	19.39	22.73	21.83	21.89
	136	X70	762	15.9	2.10 ⁵	532.2	626.8	B	7.95	300	-	21.5	18.64	17.16	18.42	14.51	18.63	17.40	19.19
	137	X70	457.2	7.9	2.10 ⁵	639	732	B	4.8	30	-	26.7	22.93	22.60	24.36	20.05	22.80	21.89	20.81
	138	X80	1219. 2	19.89	2.10 ⁵	591.6	731.6	B	1.77	607.8 9	-	23.3	20.30	20.11	22.96	20.06	22.60	20.10	20.91
	139	X80	1219. 2	13.79	2.10 ⁵	589.1	739.1	B	1.54	586.4 7	-	16.1	13.02	13.63	15.66	13.73	15.49	13.58	14.34
	140	X80	1219. 2	13.79	2.10 ⁵	568.1	712.8	B	2.3	577.0 1	-	15.3	12.91	12.64	14.49	12.60	14.34	12.57	13.57
	141	X80	1219. 2	19.89	2.10 ⁵	584.7	723.6	B	4.12	603.7 4	-	21.4	18.80	18.32	20.84	17.86	20.57	18.29	19.78
	142	X80	459	8.1	2.10 ⁵	626	737	B	2.36	208	-	22.73	20.84	20.05	21.71	18.24	21.51	20.10	21.98
	143	X80	1219. 2	19.89	2.10 ⁵	591.6	731.6	B	7.44	605.7 7	-	17.7	17.11	16.12	18.01	14.99	17.93	15.95	18.09
	144	X80	1219. 2	13.79	2.10 ⁵	589.1	739.1	B	5.45	589.4 5	-	12	8.86	10.75	11.96	10.04	11.91	10.44	12.31
	145	X80	459	8	2.10 ⁵	589	731	B	3.75	40	-	24.2	21.24	21	24.60	20.41	23.30	20.65	20.19
	146	X80	459	8.1	2.10 ⁵	626	737	B	4.05	208	-	17.36	18.07	16.47	17.26	13.85	17.46	16.31	18.79
	147	X80	459	8.1	2.10 ⁵	626	737	B	5.28	40.30	-	25.25	21.95	21.29	23.74	18.55	22.27	20.81	19.93
	148	X80	457	8.1	2.10 ⁵	601	684	B	5.39	39.6	-	22.68	21.14	20.47	22.05	17.16	20.67	19.89	19.10
	149	X80	459	8.1	2.10 ⁵	626	737	B	5.62	40	-	23.29	21.73	20.92	23.27	17.82	21.83	20.40	19.48
	150	X80	459	8.1	2.10 ⁵	626	737	B	5.69	208	-	9.94	15.12	12.44	11.71	8.90	12.29	11.48	14.80
	151	X80	1219. 2	19.89	2.10 ⁵	584.7	723.6	B	15.41	605.7 7	-	7.6	11.83	9.08	8.01	6.08	8.28	7.36	11.03
	152	X80	1219. 2	13.79	2.10 ⁵	568.1	712.8	B	10.78	588.4 2	-	4.7	3.08	5.84	4.99	3.89	4.97	4.36	7.41
[16]	153	X52	324	6.01	2.10 ⁵	382	570		3.6	19.35	18.99	16.22	14.90	14.74	20.66	17.24	19.34	14.25	13.49
	154	X52	324	10.3	2.10 ⁵	380	514		5.15	243	154.5	23.20	19.37	17.52	20.99	16.86	20.70	16.83	19.20

Annexe A

	155	X52	324	10.3	2.10 ⁵	380	514		5.15	243	30.9	22.00	19.37	17.52	20.99	16.86	20.70	16.83	19.20
	156	X52	508	6.6	2.10 ⁵	443.4	598.9		2.62	381	25.4	11.25	7.64	9.05	10.61	9.04	10.32	8.40	10.24
	157	X52	508	6.35	2.10 ⁵	429.6	672.5		3.429	900	25.4	8	5.43	6.66	8.33	7.23	7.78	5.47	6.58
	158	X52	508	6.35	2.10 ⁵	434.8	672.5		3.175	1000	25.4	8.40	5.97	7.10	8.96	7.81	8.43	6	7.07
	159	X52	508	6.7	2.10 ⁵	430	601		2.66	1016	25.4	11.55	7.52	8.49	10.10	8.83	9.60	7.56	8.93
	160	X52	323.9	9.8	2.10 ⁵	422.5	589.6		6.95	255.6	95.3	14.40	8.17	13.46	14.47	11.23	14.28	11.25	14.19
	161	X52	323.9	9.71	2.10 ⁵	422.5	589.6		6.85	350	95.3	13.58	8.20	12.86	13.33	10.69	12.35	9.73	12.34
	162	X52	323.9	9.91	2.10 ⁵	422.5	589.6		7.08	433.4	95.3	12.13	8.12	12.65	12.70	10.33	11.37	8.96	10.83
	163	X52	323.9	9.74	2.10 ⁵	422.5	589.6		7.06	527.8	95.3	11.30	7.69	11.92	11.64	9.60	10.23	8.07	8.79
	164	X52	408.2	6.2	2.10 ⁵	369	540		2.046	346	302	14.60	8.26	9.42	12.17	10.44	11.82	8.89	10.48
	165	X52	508	5.7	2.10 ⁵	435	631		1.254	200	30	13.40	9.56	9.30	12.35	10.61	12.26	9.30	10.11
	166	X52	508	5.7	2.10 ⁵	435	631		2.565	200	30	9.60	8.22	7.59	9.79	8.04	9.88	7.49	8.79
	167	X52	508	5.7	2.10 ⁵	435	631		3.762	200	30	6.96	6.88	5.79	6.83	5.34	7.08	5.37	7.14
	168	X52	508	5.7	2.10 ⁵	435	631		3.99	200	30	6.04	6.61	5.42	6.17	4.78	6.44	4.88	6.79
	169	X52	457.3	7.9	2.10 ⁵	639	732		3.07	60	30	26.60	22.30	21.95	23.82	19.58	22.86	21.95	22.04
	170	X52	457.3	7.9	2.10 ⁵	639	732		4.8	30	30	26.70	22.92	22.59	24.35	20.05	22.79	21.89	20.81
	171	X52	508	8.88	2.10 ⁵	478	636		4.44	35	35	19.54	17.56	17.40	21.76	18.28	20.55	16.99	16.41
	172	X52	508	8.88	2.10 ⁵	478	636		4.44	34.1	34.1	19.97	17.59	17.45	21.80	18.35	20.59	17.02	16.44
	173	X52	508	10.6	2.10 ⁵	506	678		5.3	37.1	35.1	24.67	22.24	22.06	27.85	23.37	26.21	21.52	20.69
	174	X52	508	10.6	2.10 ⁵	456	645		4.85	35.5	33.9	19.55	20.20	20.08	26.71	22.64	25.24	19.63	18.98
[17]	175	AISI 1020	41.94	2.73	2.10 ⁵	264	392		1.58	42	13	37.02	25.96	22.77	30.28	22.98	29.20	21.63	22.92
	176	AISI 1020	41.92	2.73	2.10 ⁵	264	392		1.59	21	13	44.65	28.64	26.15	37.58	26.93	36.46	27.01	26.42
	177	AISI 1020	41.95	2.73	2.10 ⁵	264	392		1.87	42	13	32.47	23.47	19.38	24.04	17.79	23.47	17.38	18.32
	178	AISI 1020	41.95	2.73	2.10 ⁵	264	392		1.91	21	13	41.28	26.22	22.66	31.06	21.07	31.44	23.29	22.52

Annexe A

	179	AISI 1020	41.95	2.73	2.10 ⁵	264	392		2.13	42	13	26.76	21.15	16.13	17.76	12.82	17.41	12.90	13.81
	180	AISI 1020	41.95	2.73	2.10 ⁵	264	392		2.24	21	13	34.55	23.47	18.44	21.96	13.85	24.12	17.87	18.09
[18]	181	X80	458.8	8.1	2.10 ⁵	551.6	718.2	B	5.39	39.6	31.9	22.58	19.33	18.72	23.07	17.96	21.63	18.27	17.47
[19]	182	X65	762	17.5	2.10 ⁵	464.5	563.8	B	8.75	200	50	24.11	19.09	18.03	20.70	15.97	20.46	18.54	19.19
	183	X65	762	17.5	2.10 ⁵	464.5	563.8	B	13.13	200	50	21.76	16.09	13.66	14.39	9.79	15.46	14.01	15.27
	184	X65	762	17.5	2.10 ⁵	464.5	563.8	B	8.75	200	50	17.15	19.09	18.03	20.70	15.97	20.46	18.54	19.19
	185	X65	762	17.5	2.10 ⁵	464.5	563.8	B	8.75	100	50	24.30	21.24	20.78	24.11	19.25	22.81	20.67	20.22
	186	X65	762	17.5	2.10 ⁵	464.5	563.8	B	8.75	300	50	19.80	18.02	16.62	18.51	14.51	18.67	16.92	18.43
	187	X65	762	17.5	2.10 ⁵	464.5	563.8	B	8.75	200	100	23.42	19.09	18.03	20.70	15.97	20.46	18.54	19.19
	188	X65	762	17.5	2.10 ⁵	464.5	563.8	B	8.75	200	200	22.64	19.09	18.03	20.70	15.97	20.46	18.54	19.19
[20]	189	X52	324	5.08	2.10 ⁵	389	502		0.51	9.05	50.89	17.13	13.39	13.39	15.97	14.13	15.66	13.34	13.34
	190	X52	762	17.5	2.10 ⁵	389	502		3.50	70.04	119.69	24.97	19.29	19.26	23.29	20.13	22.41	19.10	19.11
	191	X52	508	14.8	2.10 ⁵	389	502		8.14	640.7	79.8	17.42	11.21	14.63	15.58	12.90	14.55	12.40	15.01
	192	X60	459	8	2.10 ⁵	414	600		0.8	8.20	72.10	22.88	15.86	15.86	21.27	18.80	20.84	15.85	15.79
	193	X60	762	17.5	2.10 ⁵	414	600		3.50	42.48	119.69	29.36	20.75	20.74	28.06	24.49	27.07	20.55	20.44
	194	X60	324	10.3	2.10 ⁵	414	600		6.18	57.77	50.89	34.50	24.75	23.65	33.12	21.81	31.37	23.81	22.90
	195	X60	459	8	2.10 ⁵	452	542		0.80	8.20	72.10	21.25	17.32	17.32	19.22	16.99	18.83	17.27	17.24
	196	X60	762	15.9	2.10 ⁵	452	542		4.77	40.49	119.69	24.23	20.49	20.46	22.90	19.92	21.98	20.17	19.86
	197	X52	508	6.6	2.10 ⁵	462	587		0.99	12.92	79.80	16.74	13.17	13.17	15.43	13.68	15.13	13.10	13.06
	198	X52	324	8.64	2.10 ⁵	462	587		3.02	32.08	50.89	32.34	26.14	26.02	31.28	26.44	29.62	25.64	25.21
	199	X80	508	5.74	2.10 ⁵	534	661		0.57	7.31	79.80	16.43	13.26	13.26	15.10	13.43	14.89	13.23	13.21
	200	X80	324	5.08	2.10 ⁵	534	661		0.76	9.05	50.89	22.81	18.38	18.37	21.02	18.59	20.56	18.27	18.22

Annexe A

	201	X80	762	17.5	2.10 ⁵	534	661		7.88	42.48	119.6 9	32.34	26.41	26.32	30.56	26.24	28.93	25.71	24.74
	202	X80	324	8.64	2.10 ⁵	534	661		4.75	644.0 1	50.89	19.19	14.10	17.71	17.72	15.03	16.21	14.41	16.38
	203	X80	508	5.74	2.10 ⁵	589	731		0.57	7.31	79.80	18.15	14.63	14.63	16.70	14.85	16.46	14.59	14.57
	204	X80	324	5.08	2.10 ⁵	589	731		1.02	14.92	50.89	24.96	20.16	20.15	23.16	20.37	22.52	19.96	19.88
	205	X80	273	5.26	2.10 ⁵	589	731		1.58	37.89	42.88	29.09	23.47	23.25	27.24	22.84	26.19	23.21	23.40
	206	X80	762	17.5	2.10 ⁵	589	731		7	313.9	119.6 9	28.01	24.28	22.98	26.45	21.37	26.30	23.31	25.21
	207	X80	324	8.64	2.10 ⁵	589	731		5.18	390.6	50.89	19.74	13.83	18.84	18.68	15.43	17.36	15.39	19.05
	208	X100	508	5.74	2.10 ⁵	782	803		0.57	7.31	79.80	20.51	19.42	19.42	18.34	16.31	18.09	19.37	19.35
	209	X100	324	5.08	2.10 ⁵	782	803		1.02	14.92	50.89	28.71	26.76	26.75	25.45	22.37	24.73	26.50	26.40
	210	X100	273	5.26	2.10 ⁵	782	803		1.58	22.98	42.88	34.57	32.17	32.06	30.85	26.46	29.56	31.66	31.45
	211	X100	762	17.5	2.10 ⁵	782	803		7	115.4 8	119.6 9	38.22	36.16	35.56	34.81	28.36	33.20	35.57	35.46
	212	X100	324	8.64	2.10 ⁵	782	803		5.18	644.0 1	50.89	20.61	18.37	24.02	19.31	16.32	17.50	18.75	20.74
[21]	213	X42	273.3	4.95	2.10 ⁵	289	453.8 6		3.30	182.9	-	7.75	3.83	5.86	7.21	5.77	7.09	4.97	6.67
	214	X42	272.9 7	4.67	2.10 ⁵	289	453.8 6		2.62	48.26	-	13.79	8.94	8.44	12.57	9.54	12.35	8.65	8.84
	215	X42	273.5 3	4.78	2.10 ⁵	289	453.8 6		1.63	30.48	-	13.71	10.48	10.39	15.39	12.92	14.74	10.33	10.33
	216	X42	273.1	4.88	2.10 ⁵	289	453.8 6		2.18	101.6	-	15.18	8.97	8.38	12.05	9.68	12.13	8.49	9.37
	217	X42	273.8 9	4.93	2.10 ⁵	289	453.8 6		1.60	45.72	-	14.99	10.48	10.31	15.32	12.67	14.82	10.38	10.57
	218	X42	274.1 4	5	2.10 ⁵	289	453.8 6		2.16	124.4 6	-	13.35	9.08	8.46	12.02	9.79	12.06	8.44	9.51

Annexe A

	219	X42	274.4 5	4.57	2.10 ⁵	289	453.8 6		2.74	66.04	-	12.67	7.99	7.28	10.53	7.86	10.76	7.53	8.09
	220	X42	274.1 2	4.98	2.10 ⁵	289	453.8 6		2.72	38.10	-	14.8	10.02	9.66	14.48	11.24	13.89	9.73	9.67
	221	X42	274.5 2	4.83	2.10 ⁵	289	453.8 6		2.11	157.4 8	-	12.62	8.55	7.89	10.99	9.08	10.93	7.65	8.94
	222	X42	529	9	2.10 ⁵	289	415		4.70	350	-	8.83	5.16	6.79	8.31	6.83	8.19	6.27	7.75
	223	X42	529	9	2.10 ⁵	289	415		4.70	160	-	15.7	8.30	7.65	10.09	7.84	10.24	7.85	8.57
	224	X42	529	9	2.10 ⁵	289	415		5.30	150	-	14.2	8.01	7.23	9.45	7.14	9.72	7.44	8.17
	225	X46	323.3 4	8.64	2.10 ⁵	317.2	469.2 9		2.16	63.50	-	24.37	17.52	17.36	24.39	20.39	23.41	17.41	17.64
	226	X46	323.0 9	8.59	2.10 ⁵	317.2	469.2 9		2.97	203.2	-	23.11	15.25	14.47	19.63	16.25	19.31	14.36	15.89
	227	X46	323.0 9	8.64	2.10 ⁵	317.2	469.2 9		2.69	60.96	-	25.23	17.28	17.06	24.06	19.85	23.02	17.11	17.26
	228	X46	323.6	8.61	2.10 ⁵	317.2	469.2 9		3.30	144.7 8	-	23.93	15.29	14.53	20.02	16.19	19.80	14.72	15.82
	229	X46	323.6	8.64	2.10 ⁵	317.2	469.2 9		2.67	127	-	21.75	16.20	15.67	21.83	17.91	21.39	15.90	16.78
	230	X46	323.0 9	8.53	2.10 ⁵	317.2	469.2 9		2.18	50.80	-	21.56	17.54	17.42	24.44	20.57	23.38	17.38	17.48
	231	X46	323.8 5	5.08	2.10 ⁵	317.2	472.3 9		3.66	99.06	-	9.74	7.11	5.93	7.34	5.31	7.97	5.88	7.14
	232	X46	863.6	9.63	2.10 ⁵	317.2	508.0 2		3.63	213.3 6	-	10.8	6.53	6.25	9.26	7.58	9.27	6.36	6.90
	233	X46	863.6	9.47	2.10 ⁵	317.2	508.0 2		3	185.4 2	-	10.56	6.71	6.51	9.72	8.07	9.64	6.62	7.03
	234	X46	863.6	9.37	2.10 ⁵	317.2	508.0 2		4.62	91.44	-	9.17	6.71	6.53	9.89	7.91	9.54	6.55	6.63
	235	X46	273.0 5	8.26	2.10 ⁵	317.2	481.1 3		3.96	241.3 0	-	21.21	10.98	13.98	18.59	15.19	18.07	13.10	15.26

Annexe A

	236	X52	237.0 5	5.23	2.10 ⁵	358.5	502.2 7		1.85	408.9 4	-	16.71	11.24	12.66	15.48	13.34	14.64	11.49	13.52
	237	X52	237.0 5	5.26	2.10 ⁵	358.5	502.2 7		1.73	139.7 0	-	18.06	14.52	13.83	17.70	14.78	17.46	13.71	15.24
	238	X52	611.3 5	6.55	2.10 ⁵	358.5	534.5 3		3.30	901.7	-	9.45	4.19	5.05	6.13	5.32	5.74	4.24	5.34
	239	X52	506.7 3	5.74	2.10 ⁵	386.1	587.3 4		3.02	132.0 8	-	10.73	7.31	6.71	9.25	7.25	9.48	6.85	7.72
	240	X52	504.9 5	5.66	2.10 ⁵	386.1	587.3 4		3.25	462.2 8	-	8.05	4.05	5.33	6.41	5.44	6.01	4.34	5.95
	241	X52	508	5.69	2.10 ⁵	386.1	587.3 4		3.76	619.7 6	-	8.58	3.22	4.50	5.02	4.28	4.57	3.30	4.50
	242	X52	508	5.74	2.10 ⁵	386.1	587.3 4		3.84	533.4	-	9.89	3.17	4.54	5.04	4.27	4.58	3.31	4.74
	243	X52	508	5.74	2.10 ⁵	386.1	587.3 4		3.05	416.5 6	-	10.91	4.49	5.76	7.15	6.05	6.79	4.91	6.55
	244	X52	508	5.61	2.10 ⁵	386.1	587.3 4		3.35	596.9	-	8.05	3.77	4.96	5.83	4.99	5.38	3.89	5.24
	245	X52	508	5.64	2.10 ⁵	386.1	587.3 4		2.46	170.1 8	-	11.51	7.40	6.90	9.46	7.73	9.57	6.92	7.90
	246	X60	323.9	9.79	2.10 ⁵	413.7	542		6.99	488.7	-	11.91	7.86	12.10	11.29	9.27	10.01	8.40	9.66
	247	X60	508	6.60	2.10 ⁵	413.7	598.9		2.62	381	-	11.30	7.13	8.44	10.61	9.04	10.32	7.84	9.55
	248	X60	508	6.7		413.7	601		2.66	1016	-	11.60	7.23	8.16	10.09	8.83	9.60	7.27	8.59
	249	X60	508	6.40	2.10 ⁵	413.7	672.5		3.46	899.2	-	8	5.26	6.46	8.39	7.28	7.83	5.30	6.38
	250	X60	508	6.40	2.10 ⁵	413.7	672.5		2.18	899.2	-	11.8	7.56	8.36	11.76	10.30	11.25	7.61	9.03
	251	X60	508	6.40	2.10 ⁵	413.7	672.5		3.18	1000. 8	-	8.4	5.76	6.84	9.09	7.92	8.56	5.79	6.83
	252	X60	720	8	2.10 ⁵	413.7	535		4.30	180	-	10.3	7.65	7.01	8.23	6.41	8.44	7.18	8.08
	253	X60	720	8	2.10 ⁵	413.7	535		4.40	320	-	8.83	7.06	6.26	6.89	5.60	6.96	5.92	7.46
	254	X60	720	8	2.10 ⁵	413.7	535		6.20	180	-	7.55	6.26	5.02	5.08	3.59	5.71	4.85	6.46

Annexe A

	255	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448.2	600		4.40	200	-	24.11	20.73	20.38	25.78	21.49	25.07	20.60	21.27
	256	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448.2	600		8.80	200	-	21.76	18.39	17.35	21.97	16.94	21.73	17.85	18.47
	257	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448.2	600		13.10	200	-	17.15	15.55	13.21	15.37	10.48	16.51	13.56	14.77
	258	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448.2	600		8.80	100	-	24.3	20.48	20.03	25.63	20.45	24.25	19.92	19.48
	259	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448.2	600		8.80	300	-	19.08	17.35	15.99	19.63	15.37	19.81	16.28	17.74
	260	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448.2	600		8.80	200	-	23.42	18.39	17.35	21.97	16.94	21.73	17.85	18.47
	261	X65	762	17.5	2.10 ⁵	448.2	600		8.80	200	-	22.64	18.39	17.35	21.97	16.74	21.73	17.85	18.47
	262	X80	1219	19.89	2.10 ⁵	551.6	740		15.41	605.7 2	-	9.3	11.16	8.57	8.18	6.22	8.47	6.94	10.41
	263	X80	1219	19.89	2.10 ⁵	551.6	740		1.77	607.7 4	-	23.3	18.93	18.75	23.22	20.29	22.86	18.74	19.50
	264	X80	1219	13.79	2.10 ⁵	551.6	740		10.78	588.3 7	-	5.2	2.99	5.67	5.18	4.04	5.16	4.23	7.20
	265	X100	1320	22.9	2.10 ⁵	689.5	886		11.36	609.0 3	-	19.1	19.58	17.84	20.37	16.41	20.59	17.62	20.38
	266	X100	1320	22.9	2.10 ⁵	689.5	886		11.52	514.9 8	-	19.9	19.84	18.17	21.03	16.70	21.36	18.28	20.64
[22]	267	X65	762	17.5	2.10 ⁵	495	565		8.75	50	50	27.5	24.19	24.04	25.84	21.87	24.30	23.42	22.39
	268	X65	762	17.5	2.10 ⁵	495	565		8.75	100	50	24.30	22.63	22.14	24.16	19.29	22.86	22.03	21.55
	269	X65	762	17.5	2.10 ⁵	495	565		8.75	200	50	21.80	20.35	19.21	20.74	16.01	20.50	19.76	20.45
	270	X65	762	17.5	2.10 ⁵	495	565		8.75	300	50	19.80	19.20	17.72	18.55	14.54	18.71	18.03	19.64
	271	X65	762	17.5	2.10 ⁵	495	565		8.75	600	50	16.50	12.50	16.12	15.87	13.04	15.51	14.95	17.93
	272	X65	762	17.5	2.10 ⁵	495	565		8.75	900	50	15	12.05	15.64	14.96	12.56	14.09	13.58	16.68
	273	X42	426	6.95	2.10 ⁵	240	390		2.70	160	25	10.80	7.03	6.65	9.91	8.12	9.92	6.71	7.40
	274	X42	426	7	2.10 ⁵	240	390		3.80	150	21	9.81	6.41	5.81	8.47	6.62	8.68	5.87	6.64
	275	X42	426	7	2.10 ⁵	240	390		5.20	150	25	7.85	5.38	4.36	5.64	4.11	6.15	4.16	5.32
	276	X42	529	9	2.10 ⁵	285	415		4.70	350	25	8.83	5.09	6.70	8.31	6.83	8.19	6.18	7.65

Annexe A

	277	X42	529	9	2.10 ⁵	285	415		4.70	160	25	15.70	8.19	7.55	10.09	7.84	10.24	7.74	8.46
	278	X42	529	9	2.10 ⁵	285	415		5.30	150	25	14.20	7.89	7.13	9.45	7.14	9.72	7.34	8.06
	279	X60	720	8	2.10 ⁵	425	535		4.30	180	25	10.30	7.89	7.20	8.23	6.41	8.44	7.37	8.30
	280	X60	720	8	2.10 ⁵	425	535		4.30	320	26	8.83	7.34	6.53	7.04	5.73	7.11	6.21	7.76
	281	X60	720	8	2.10 ⁵	425	535		6.20	180	26	7.55	6.44	5.16	5.08	3.59	5.71	4.99	6.64
	282	X100	1422. 4	19.25	2.10 ⁵	740	774		10.40	180	0.5	15.35	19	18.28	18.15	14.13	17.55	18.46	18.63
	283	X100	1422. 4	20.10	2.10 ⁵	795	840		3.80	385	0.5	20.12	22.87	22.51	22.11	18.89	21.81	22.70	23.75
	284	X100	914.4	16.40	2.10 ⁵	739	813		9	150	0.5	21.40	24.54	23.40	24.51	18.77	23.83	23.83	24.04
	285	X100	914.4	16.40	2.10 ⁵	739	813		6	450	0.5	24.02	23.73	22.43	22.43	18.62	22.32	22.32	25.01
[23]	286	X100	1320	22.9	2.10 ⁵	782.5	803.3		11.45	608.5 2	-	18.1	22.15	20.16	18.37	14.78	18.57	19.90	23.04
	287	X100	1320	22.9	2.10 ⁵	782.5	803.3		11.45	514.6 3	-	17.9	22.56	20.69	19.14	15.22	19.43	20.82	23.48
	288	X100	1320	22.9	2.10 ⁵	782.5	803.3		11.45	1008. 40	-	15	14.93	19.06	16.64	13.84	16.19	17.34	21.51
	289	X120	342	13.54	2.10 ⁵	342	840		0.24	342	-	80.6	29.26	29.45	68.43	59.02	65.71	29.43	29.74
	290	X120	342	13.54	2.10 ⁵	342	840		0.64	342	-	80.2	28.38	28.89	67.04	57.62	64.37	28.82	29.57
	291	X120	342	13.54	2.10 ⁵	342	840		2.54	342	-	74.5	24.2	26.12	60.05	50.69	57.65	25.82	27.85
	292	X120	342	13.54	2.10 ⁵	342	840		3.64	342	-	66.1	21.78	24.43	55.67	46.47	53.48	23.95	26.35
	293	X120	252	15.73	2.10 ⁵	242	930		0.33	242	-	143	32.89	32.82	122.32	102.90	114.69	32.82	33.16
	294	X120	252	15.73	2.10 ⁵	242	930		1.43	242	-	136	31.75	31.45	117.08	97.46	109.86	31.44	32.56
	295	X120	252	15.73	2.10 ⁵	242	930		2.63	242	-	130	30.47	29.88	110.98	91.27	104.30	29.85	31.46
[24]	296	X60	323.9	9.80	2.10 ⁵	452	542	B	2.72	255.6	27.2	14.40	21.73	24.63	27.21	22.83	26.47	24.28	26.76
	297	X60	323.9	9.66	2.10 ⁵	452	542	B	2.90	305.6	29	14.06	20.75	23.55	25.73	21.66	24.90	22.84	25.67
	298	X60	323.9	9.71	2.10 ⁵	452	542	B	2.78	350	27.8	13.57	21.27	23.84	25.96	21.97	24.99	22.93	25.88

Annexe A

	299	X60	323.9	9.71	2.10 ⁵	452	542	B	2.80	394.5	28	12.84	21.21	23.69	25.67	21.79	24.59	22.56	25.64
	300	X60	323.9	9.91	2.10 ⁵	452	542	B	2.60	433.4	26	12.12	22.44	24.70	26.84	22.88	25.66	23.54	26.63
	301	X60	323.9	9.74	2.10 ⁵	452	542	B	2.72	466.7	27.2	11.91	21.55	23.83	25.74	21.95	24.53	22.50	25.66
	302	X60	323.9	9.79	2.10 ⁵	452	542	B	2.80	488.7	28	11.90	21.45	23.76	25.60	21.85	24.35	22.33	25.54
	303	X60	323.9	9.79	2.10 ⁵	452	542	B	2.80	500	28	11.98	21.45	23.74	25.57	21.83	24.30	22.29	25.50
	304	X60	323.9	9.74	2.10 ⁵	452	542	B	2.60	527.8	26	11.30	21.92	24.01	25.93	22.20	24.65	22.61	25.75
[25]	305	X52	324	10.3	2.10 ⁵	380	514	B	5.15	243	154.5	21.9	19.37	17.52	20.99	16.86	20.70	16.83	19.20
	306	X52	324	10.3	2.10 ⁵	380	514	B	5.15	243	154.5	19.5	19.37	17.52	20.99	16.86	20.70	16.83	19.20
	307	X52	324	10.3	2.10 ⁵	380	514	B	3.09	121.5	30.9	29	23.46	22.82	29.34	23.95	28.48	23.16	24.10
	308	X52	324	10.3	2.10 ⁵	380	514	B	3.09	121.5	30.9	28.6	23.46	22.82	29.34	23.95	28.48	23.16	24.10
	309	X52	324	10.3	2.10 ⁵	380	514	B	3.09	121.5	30.9	28.7	23.46	22.82	29.34	23.95	28.48	23.16	24.10
	310	X52	324	10.3	2.10 ⁵	380	514	B	5.15	243	30.9	18.6	19.37	17.52	20.99	16.86	20.70	16.83	19.20
	311	X80	458.8	8.1	2.10 ⁵	534.1	661.4	B	5.62	39.6	32	21.14	18.58	17.89	20.94	16.06	19.63	17.44	16.65
	312	X80	458.8	8.1	2.10 ⁵	534.1	661.4	B	5.32	39.6	31.9	20.31	18.76	18.20	21.33	16.67	20.01	17.77	16.99
	313	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	497.7	B	4.9	35	35	19.55	14.96	14.84	18.68	15.70	17.60	14.47	13.93
	314	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	497.7	C	4.85	35.5	33.7	20.68	14.96	14.84	18.67	15.70	17.61	14.47	13.94
	315	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	497.7	C	4.8	35.5	35.5	19.59	14.97	14.85	18.69	15.72	17.63	14.49	13.97
	316	X52	508	9.7	2.10 ⁵	372	497.7	C	4.85	35.5	33.6	19.65	14.96	14.84	18.67	15.70	17.61	14.47	13.94
[26]	317	X70	457.2	7.92	2.10 ⁵	483	565	B	3.2	60	30	26.6	16.83	16.55	18.35	15.02	17.60	16.55	16.59
	318	X70	457.2	7.92	2.10 ⁵	483	565	B	4.8	30	30	26.7	17.38	17.13	18.86	15.53	17.65	16.60	15.78
[27]	319	X52	408.2	6.2	2.10 ⁵	369	540		2.04	346	302	14.60	8.27	9.43	12.18	10.45	11.84	8.90	10.49
	320	X52	407.2	5.9	2.10 ⁵	408	576		3.36	142	120	12.72	9.34	8.35	10.41	8.12	10.75	8.37	9.73
	321	X52	407.2	6	2.10 ⁵	408	576		5.22	346	382	12.84	1.71	4.06	2.85	2.30	2.40	1.87	3.86
	322	X70	610.5	6.8	2.10 ⁵	553	680		2.04	742	242	14.21	9.48	10.44	11.24	9.82	10.81	9.67	11.53

Annexe A

	323	X70	610.5	6.7	2.10 ⁵	553	680		2.61	412	201	14.37	8.15	9.62	10.28	8.78	10.04	8.98	10.97
	324	X70	763.2	8.4	2.10 ⁵	539	655		5.71	331	402	12.31	8.09	6.68	6.40	5.04	6.55	5.93	8.29
	325	X70	763.4	8.5	2.10 ⁵	535	652		4.08	398	260	14.10	6.81	8.69	9.13	7.59	9.07	8.18	10.16
	326	X70	763.2	8.4	2.10 ⁵	568	691		6.13	294	386	14.78	8.22	6.59	6.11	4.69	6.42	5.80	8.40
	327	X70	763.7	8.5	2.10 ⁵	562	604		6.63	203	200	12.48	8.37	6.63	5.46	3.88	6.13	6.28	8.62
	328	X70	762.9	8.4	2.10 ⁵	546	659		4.95	482	282	12.26	5.43	7.45	7.24	6.01	7.02	6.39	8.77
	329	X70	764.1	8.4	2.10 ⁵	515	628		6.3	979	238	12.96	3.11	4.90	3.91	3.33	3.49	3.15	4.26

References

- [1] Al-Owaisi, S., Becker, A. A., Sun, W., Al-Shabibi, A., Al-Maharbi, M., Pervez, T., & Al-Salmi, H. (2018). An experimental investigation of the effect of defect shape and orientation on the burst pressure of pressurised pipes. *Engineering Failure Analysis*, 93, 200-213.
- [2] Baek, J. H., Kim, W. S., & Kim, Y. P. (2006). Comparative study for various repair methods of in-service pipeline using full scale burst test. In *23th World Gas Conference, Amsterdam*.
- [3] Shuai, Y., Shuai, J., & Xu, K. (2017). Probabilistic analysis of corroded pipelines based on a new failure pressure model. *Engineering failure analysis*, 81, 216-233.
- [4] Mazurkiewicz, L., Tomaszewski, M., Malachowski, J., Sybilski, K., Chebakov, M., Witek, M., ... & Dmitrienko, R. (2017). Experimental and numerical study of steel pipe with part-wall defect reinforced with fibre glass sleeve. *International journal of pressure vessels and piping*, 149, 108-119.
- [5] Bouledroua, O., Zelmati, D., & Hassani, M. (2019). Inspections, statistical and reliability assessment study of corroded pipeline. *Engineering failure analysis*, 100, 1-10.
- [6] Belachew, C. T., Mokhtar, C. I., & Karuppanan, S. (2016). Strength assessment of a corroded pipeline through the burst test: case study. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 7(3), 04016003.
- [7] Besel, M., Zimmermann, S., Kalwa, C., Koßpe, T., & Liessem, A. (2010, January). Corrosion assessment method validation for high-grade line pipe. In *International Pipeline Conference* (Vol. 44236, pp. 385-394).
- [8] Choi, J. B., Goo, B. K., Kim, J. C., Kim, Y. J., & Kim, W. S. (2003). Development of limit load solutions for corroded gas pipelines. *International journal of pressure vessels and piping*, 80(2), 121-128.
- [9] Freire, J. L. F., Vieira, R. D., Castro, J. T. P., & Benjamin, A. C. (2006). Part 3: Burst tests of pipeline with extensive longitudinal metal loss. *Experimental Techniques*, 30(6), 60-65.

Références

- [10] Freire, J. L. F., Vieira, R. D., Diniz, J. L. C., & Meniconi, L. C. (2007). Part 7: Effectiveness of composite repairs applied to damaged pipeline. *Experimental Techniques*, 31(5), 59-66.
- [11] Freire, J. L., Benjamin, A. C., Vieira, R. D., & Diniz, J. L. (2011). Strain Analysis of Pipeline Test Specimens Containing Longitudinal and Circumferential Corrosion Defects. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 70, pp. 422-427). Trans Tech Publications Ltd.
- [12] Kim, Y. P., Kim, W. S., Lee, Y. K., & Oh, K. H. (2004, January). The evaluation of failure pressure for corrosion defects within girth or seam weld in transmission pipelines. In *International Pipeline Conference* (Vol. 41766, pp. 1847-1855).
- [13] Souza, R. D., Benjamin, A. C., Vieira, R. D., Freire, J. L. F., & Castro, J. T. P. (2007). Part 4: Rupture tests of pipeline segments containing long real corrosion defects. *Experimental Techniques*, 31(1), 46-51.
- [14] Yeom, K. J., Lee, Y. K., Oh, K. H., & Kim, W. S. (2015). Integrity assessment of a corroded API X70 pipe with a single defect by burst pressure analysis. *Engineering Failure Analysis*, 57, 553-561.
- [15] Abdelghani, M., Tewfik, G., Djahida, D., & Sid Ahmed, S. (2018). Prediction of the Rupture Pressure of Transmission Pipelines with Corrosion Defects. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 140(4).
- [16] Shuai, Y., Zhang, X., Feng, C., Han, J., & Cheng, Y. F. (2022). A novel model for prediction of burst capacity of corroded pipelines subjected to combined loads of bending moment and axial compression. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 104621.
- [17] Netto, T. A., Ferraz, U. S., & Estefen, S. F. (2005). The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipelines. *Journal of constructional steel research*, 61(8), 1185-1204
- [18] Sun, M., Zhao, H., Li, X., Liu, J., & Xu, Z. (2021). A new evaluation method for burst pressure of pipeline with colonies of circumferentially aligned defects. *Ocean engineering*, 222, 108628.

Références

- [19] Oh, C. K., Kim, Y. J., Baek, J. H., Kim, Y. P., & Kim, W. S. (2007). Ductile failure analysis of API X65 pipes with notch-type defects using a local fracture criterion. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84(8), 512-525.
- [20] Kere, K. J., & Huang, Q. (2022). Development of probabilistic failure pressure models for pipelines with single corrosion defect. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 197, 104656.
- [21] Ma, B., Shuai, J., Liu, D., & Xu, K. (2013). Assessment on failure pressure of high strength pipeline with corrosion defects. *Engineering Failure Analysis*, 32, 209-219.
- [22] Gao, J., Yang, P., Li, X., Zhou, J., & Liu, J. (2019). Analytical prediction of failure pressure for pipeline with long corrosion defect. *Ocean Engineering*, 191, 106497.
- [23] Bhardwaj, U., Teixeira, A. P., & Soares, C. G. (2021). Burst strength assessment of X100 to X120 ultra-high strength corroded pipes. *Ocean Engineering*, 241, 110004.
- [24] Benjamin, A. C., Vieira, R. D., Freire, J. L. F., & de Castro, J. T. (2000, October). Burst tests on pipeline with long external corrosion. In *International pipeline conference* (Vol. 40252, p. V002T06A013). American Society of Mechanical Engineers.
- [25] Zhang, S., & Zhou, W. (2022). Assessment of the interaction of corrosion defects on steel pipelines under combined internal pressure and longitudinal compression using finite element analysis. *Thin-Walled Structures*, 171, 108771.
- [26] Benjamin, A. C., Freire, J. L. F., Vieira, R. D., & Cunha, D. J. (2016). Interaction of corrosion defects in pipelines—Part 2: MTI JIP database of corroded pipe tests. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 145, 41-59.
- [27] Zhang, S., & Zhou, W. (2020). Assessment of effects of idealized defect shape and width on the burst capacity of corroded pipelines. *Thin-Walled Structures*, 154, 106806.
- [28] <https://www.aps.dz/economie/138078-exploration-petroliere-l-annee-2022>: Exploration pétrolière : l'année 2022 commence sous de bons auspices
- [29] <https://www.lafinancepourtous.com/decryptages/entreprise/secteurs-dacti>: Le marché du pétrole.
- [30] Rapport Sonatrach : Essai d'éclatement de tube prélevé du GG1 PK-266.895.
- [31] Mémoire de fin d'étude, MIMOUNE Anter et SAADA Zakaria (2012) : Amélioration de la qualité du pétrole brut LDHP.

Références

- [32] THESIS of Doctorat, Omar Bouledroua (2017): HARMFULNESS AND REPAIRING OF CORROSION DEFECTS IN PIPE MODE OF X70 STEEL.
- [33] Rapport Sonatrach : Description du réseau de transport par canalisation des hydrocarbures et tarif de transport.
- [34] Thèse de doctorat Tahar Nateche : Réhabilitation et Renforcement des Canalisations sous pression en présence des défauts de surfaces.
- [35] Rapport Sonatrach: Réparation d'urgence.
- [36] NTSB, Integrity Management of Gas Transmission Pipelines in High Consequence Areas. 2015, National Transportation Safety Board: Washington, DC, USA.
- [37] American National Standard Institute (ANSI)/American Society of Mechanical Engineers (ASME). Manual for determining strength of corroded pipelines, ASME B31G; 1984.
- [38] DNV RP-F101 (2) DNV-RP-F101: Corroded pipelines. Det Norske Veritas; 1999
- [39] D. Ritchie, S. Last, Burst criteria of corroded pipelines-defect acceptance criteria, in: Proceedings of the EPRG/PRC 10th Biennial Joint Technical Meeting on Line Pipe Research, 1995. Cambridge, UK. Paper 32
- [40] D.R. Stephens, B.N. Leis, Development of alternative criterion for residual strength of corrosion defects in moderate-to-high-toughness pipe, in: Proc. 3th. Int. Conf. Pipe, Canada, Calgary, Alberta, 2000.
- [41] Canadian Standards Association, Z662, Oil and Gas Pipeline Systems, 2015.
- [42] Netto, T. A., Ferraz, U. S., & Estefen, S. F. (2005). The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipelines. *Journal of constructional steel research*, 61(8), 1185-1204.
- [43] <https://www.aps.dz/economie/140613-opec-la-production-petroliere-de-l-algerie-augmentera-a-1-039-mbj-en-juillet>.