

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية ..

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة اللم العالى والبحث العلمى

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبى بكر بلقايد- تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR LMD**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Engineering des Matériaux

Par : **BENKHEDDA Fatima**

Sujet

« Étude sur la Corrosion et la détection CND des défaillances par ultrasons dans les aciers API 5L X60 - Cas des ouvrages de pipelines d'hydrocarbures – ligne GZ1 40 »

Soutenue publiquement, le 30 / 11 /2024 , devant le jury composé de :

Mr Ghernaout Mohamed El Amine	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr Bensaid Ismail	MCA	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
Mr Benachour Mustapha	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mr Hadjel Mohammed	Professeur	Université USTO-MB Oran	Examineur
Mme Bournane Karima	MCA	Université USTB Alger	Examinatrice
Mr BENMOUSSAT Abderrahim	Professeur	Ex Université de Tlemcen	Membre Invité
Mr Benacer Djamel	Docteur	Sonatrach –Remich Tlemcen	Membre Invité

Année Universitaire 2024 2025

Thèse préparée avec la collaboration de Sonatrach / TRC Bethioua et CRD Boumerdès —Algérie

Table des Matières

Abstract

Nomenclature

Introduction générale.....01

Chapitre I : Étude bibliographique

I. Introduction.....	06
I.1 Défaillances des aciers de pipeline par corrosion.....	08
I.1.1 Aciers de pipelines	08
I.1.2 Corrosion par les sols.....	09
I.2 Evaluation de la corrosion des aciers de pipelines par les sols.....	12
I.2.1 Méthode gravimétrique (weight loss)	12
I.2.2 Méthodes électrochimiques	13
I.1.3.2.1 Méthodes stationnaires	14
I.2 Méthodes de détection des défauts dans les aciers.....	16
I.2.1 Types de défauts dans les aciers.....	16
I.2.2 Défaillances mécaniques des aciers de pipelines.....	17
I.2.3 Types de ruptures.....	17
I.2.4 Défaillances par Déformation plastiques dans les aciers de pipelines.....	18
I.2.5 Défaillances par fissuration.....	18
I.3 Méthodes de détection des défauts (Techniques CND)	19
I.3.1 Détection par flux magnétique	19
I.3.2 Détection par rayonnement.....	20
I.2.3.2 Détection par ultrason.....	21
I.4 Application des ultrasons à la détection des défauts de surface dans les aciers de pipelines API 5L X60.....	22
I.4.1 Détection de défauts par Ultrasons TOFD.....	23
I.4.2 Détection de défauts par Ultrasons C-Scan.....	24
I.5 Synthèse bibliographique :	25
I.6 Conclusion	26

Chapitre II : Contexte industriel.

II. Introduction :	31
II.1 Expertise de la ligne GZ1 :	32
II.2 Conclusion :	34

Chapitre III : Matériels et méthodes

III Introduction :	36
III.1 Caractérisation de l'acier :	36
III.1.1 Analyse chimique de l'acier	36
III.1.2 Microstructure	37
III.1.3 Caractéristiques mécaniques	37
III.2 Solution de sol :	38
III.3 Essais de traction	39
III.4 Tests de détection ultrasons des défauts de surface API 5LX60	41
III.5 Conclusion :	43

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV Introduction :	46
IV.1 Propriétés de l'acier :	47
IV.1.1 Corrosion de l'acier API 5LX60 :	48
IV.2 Détection des défauts de surface de l'acier API 5LX60 par les technique ultrasons C-Scan et TOFD	
IV.3 Répartition des contraintes équivalentes de Coque cylindrique avec défaut parabolique réparée par collage de composite :	49
IV.4 Conclusion	53
Conclusion générale et perspectives	56
V Bibliographie :	57

Remerciements

Je remercie le tout puissant DIEU qui m'a donné le courage, la volonté et la force pour mener à terme ce travail.

Je remercie grandement mon directeur de thèse, Monsieur BENMOUSSAT Abderrahim, ex Professeur à l'université de Tlemcen pour toute son aide d'avoir dirigé ce travail, son soutien son encouragement et ses nombreux conseils tout au long de ces mois de réalisation de la thèse pour m'avoir offert la possibilité d'intégrer le monde de la recherche scientifique, ainsi que pour sa confiance, son support et pour m'avoir donné ses avis et ses instructions. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

Je remercie Monsieur BENSALD Ismail, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen pour avoir accepté de finaliser ma thèse après le départ du directeur de thèse pour faire valoriser ses droits à la retraite

Je remercie Monsieur M. BENTAHAR Enseignant-Chercheur LAUM - ENSIM, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine LE MANS - France pour sa collaboration efficace durant les stages pratiques.

Je remercie tout le personnel Sonatrach / Bethioua et CRD Boumerdes pour leur contribution à la réalisation de cette thèse, particulièrement Mr BELABACI Djelloul, Mr GANA et Mr AMARA Zenati Abdeldjellil.

Je remercie Monsieur GHERNAOUT Amine ; professeur à l'université Abou BekrBelkaïd De Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait d'avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Je remercie Monsieur BENACHOUR Mustapha, professeur à l'université Abou BekrBelkaïd De Tlemcen, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de l'examiner et qui m'a fait l'honneur de faire partie du jury de soutenance

Je remercie Monsieur Hadjel Mohammed, Professeur à l'université des sciences et technologie USTO MB Oran pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de faire partie du jury de soutenance en qualité d'examineur.

Je remercie Madame BOURNANE Karima de l'université des sciences et technologie Houari Boumediene d'Alger pour avoir accepté de

faire partie du jury après avoir été informée que son article paru dans la revue ALJEST a été cité dans notre publication.

Je remercie les membres du laboratoire de recherche d'Application des Electrolytes et des Poly électrolytes Organiques (LAEPO) de l'université de Tlemcen, particulièrement Monsieur BOURAS Brahim, directeur du laboratoire et Professeur à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen pour son support.

Je remercie tous ceux ou celles qui ont contribués (es) de près ou de loin à la réalisation de cette thèse. Particulièrement Dr Abdeljalil AMARA Zenati pour sa contribution à la réalisation de cette thèse Dr Sid Ahmed BENMANSOUR pour son soutien jusqu'à la finalisation, Dr BENACER Djamal pour sa contribution dans le jury en tant que membre invité de la Société Sonatrach -Remich.

Je remercie mes parents et toute ma famille pour m'avoir soutenu tout au long de ce travail, ma mère, mon père mes frères, et sœurs mes oncles et mes tantes

Dédicaces

J'ai l'honneur de dédier ce travail :

À l'âme du prophète Mohamed, que dieu le bénit, qui nous a éclairé la voie du bonheur.

A mes parents

À tous les membres de ma famille qui ont toujours été affectueux et serviables en témoignage de mon amour, je vous souhaite la bonne santé.

Benkhedda Fatima

Liste des figures

Figure 1 : Cas de défaillance par corrosion externe dans l'acier de pipeline API5LX60.....	07
Figure 2 : Mécanisme de formation de piqûre de corrosion lors de l'interaction de l'acier de pipeline avec les sols.....	07
Figure 3 : Diagramme de classification des textures de sol (JAMAGNE, 1976)	10
Figure 4 : Relation entre corrosivité des sols et de leur taux d'humidité	11
Figure 5 : Dispositif de mesures électrochimiques	13
Figure 6 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.....	14
Figure 7 : Représentation graphique d'un diagramme de Nyquist.....	15
Figure 8 : Mode d'ouverture de la fissure selon la mécanique de la rupture.....	18
Figure 9 : Principe de la détection magnétique.....	20
Figure 10 : Principe de la détection par rayonnement X.....	21
Figure 11 : Principe de la détection par émission acoustique	23
Figure 12 : Principe de la détection des défauts par ultrasons TOFD.....	24
Figure 13 : Principe de la détection des défauts par ultrasons C-Scan (Couplant à eau)	25
Figure 14 : Cartographie du Réseau de Transport exploitée par SONATRACH (2021)	26
Figure 15 : Répartition de la longueur de réseau de transport par canalisation selon les produits Transportés où le gaz naturel est majoritaire représentant presque la moitié.....	27
Figure 16 : Exemples de défauts de surface externes sur la ligne GZ1 40''	28
Figure 17 : Microstructure de l'acier pour pipeline API 5L X60 après attaque dans une solution à 2 % de Nital	30
Figure 18 : Evolution du potentiel de corrosion libre en fonction du temps ($t = f(E)$) pour l'acier API 5L X60 immergé dans la solution simulée de sol artificiel.....	32
Figure 19 : Courbes de polarisation potentiodynamique ($\text{Log } i = f(E)$) pour l'acier API 5L X60 dans Une solution de simulation de sol artificiel à des valeurs de pH comprises entre 4,0 et 8,0 et à une température de 25 °C.....	33
Figure 20 : Courbes de polarisation potentiodynamique ($\text{Log } i = f(E)$) pour l'acier API 5L X60 dans une solution de simulation de sol artificiel dans une plage de température de 25 à 50 °C et un pH = 6,0.....	34

Figure 21 : Spectre ultrasonore TOFD du premier échantillon d'acier (10 × 20 cm) ne contenant aucun défaut de surface. Temps (μs)	42
Figure 22 : Spectre ultrasonore C-Scan du premier échantillon d'acier (10 × 10 cm) ne contenant aucun défaut de surface. (Amplitude (%).)	42
Figure 23 : Spectre ultrasonore TOFD du deuxième échantillon d'acier (10 × 20 cm) contenant un défaut de surface sous forme de piqûre de corrosion (Temps (μs)).....	43
Figure 24 : Image ultrasonore C-scan du deuxième échantillon d'acier contenant un défaut de surface sous forme de piqûre de corrosion (Amplitude (%))	43
Figure 25 : Spectre ultrasonore TOFD du troisième échantillon d'acier contenant plus de défauts de surface tels que des piqûres de corrosion et des défauts de soudure (Temps (μs)).....	52
Figure 26 : Image ultrasonique C-scan du troisième échantillon d'acier contenant des défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion et de défauts de soudure (Amplitude (%).)	53
Figure 27 : Image ultrasonique C-scan du troisième échantillon d'acier (10 × 20 cm) contenant des défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion et de défauts de soudure ((Position (μs))....	53
Figure 28 : Principe du contrôle du pipeline par outil intelligent à ultrason.....	61
Figure 29 : Outil intelligent type " Magne Scan HR" pour le contrôle par ultrasons des pipelines.	61

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des particules de sol en fonction de leur taille.....	09
Tableau 2 : La relation entre la résistivité du sol et la corrosion.....	11
Tableau 3 : Paramètres énergétiques d'écoulement du gaz naturel à la sortie des stations de compression.....	32
Tableau 4 : Composition chimique (%) de l'acier API 5L X60 réalisée par analyse Spectrophotométrique.....	36
Tableau 5 : Caractéristiques mécaniques de l'acier API5LX60 selon la norme API Standard (Re : Limite d'élasticité, Rm : Résistance à la rupture, A : Allongement à la rupture)	37
Tableau 6 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes plates en acier normalisé API 5L X60 après immersion sans immersion et immersion dans la solution de sol artificiel simulé obtenue par essais de traction à température ambiante.....	38
Tableau 7 : Composition chimique des solutions de sol extrait de divers sites GZ1.....	39
Tableau 8 : Composition chimique de la solution de sol reconstituée en tant que solution de sol la plus agressive appelée « solution artificielle de simulation de sol » choisie pour l'analyse.....	39

*N*OTATIONS ET SYMBOLES:

API	Institut américain du pétrole
TOFD	Diffraction en temps de vol
C-Scan	Technique qui utilise des ultrasons et des scanners mécanisés
HSLA	Aciers faiblement alliés à haute résistance
TMCP	Procédé Thermo Mécanique Contrôlé
GZ1	Ligne gazoduc 40" HassiR'mel Arzew
X60	Désignation américaine pour les aciers des gazoducs
SC	Station de compression
PC	Protection cathodique
d	Densité de l'acier
Rm	Résistance à la rupture
Re	Limite d'élasticité
PH	Potentiel hydrogène
TRC	Transport par canalisation
CRD	Centre de recherche et développement
LAUME	Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans
CND	Control non destructif
m_0	Masse initial
m_i	Masse finale
Δm	Perte de masse
V	Vitesse de corrosion
S	Surface exposée
t	Temps d'exposition dans la solution corrosive
θ	Le taux de corrosion
K	constante $8,76 \times 10^4$ (pour unités en mm/an)
d	Densité de l'acier
i_{cor}	Intensité du courant de corrosion
E_{corr}	Potentiel de corrosion

SIE	Spectroscopie d'impédance électrochimique
V_L	Vitesse d'onde longitudinale
V_T	Vitesse d'onde de transversale
V_S	Vitesse d'onde de surface
2d	distance parcourue par l'onde
E	Module de Young du matériau (GPa)
ρ	Masse spécifique du matériau
μ	Masse spécifique du matériau
STC	Systèmes de Transport par Canalisation
STT	Station de traitement des tubes
MEP	Microscopie électrique à balayage
SCE	électrode au calomel saturé
HLE	Haute limite élastique
2d	Contrainte d'écoulement du matériau ou la limite d'écoulement
ΔT	Temps d'émission et de réflexion
σ	contrainte (MPa)
ρ	Résistivité du sol ($\Omega.cm$)
Z	rupture par striction
dB	décibel
ρ	Résistivité du sol ($\Omega.cm$)
Z	rupture par striction

Abstract

Pipeline steels are subject to failure by corrosion which poses problems for the reliability of pipeline transport and the environment. The thesis focuses in a first on the API5LX60 steels corrosion behavior by soils from the GZ1 gas pipeline using electrochemical techniques and an artificial soil solution. The samples were obtained by coupons cut from corroded tubes obtained during the maintenance operations. The second step is the surface defects detection using TOFD and C-Scan ultrasound techniques. Potentiodynamic results have shown that steel is sensitive to corrosion by the soil when protection is failing, accentuated by low resistivity soils, pH, chemical composition, water content, mechanical stresses, etc. The mechanical characteristic decreases depending on the immersion duration. This reduction is mainly due to the corrosion effect and immersion duration which is the cause of a direct degradation of the steel mechanical characteristics. Defects surface detection by TOFD non-contact ultrasonic method and by C-Scan ultrasonic immersion showed that the diffracted ultrasonic wave occurring at the edges of the defects does not appear in the defect's absence. The signal remains stable at all times from 0 to 138.2 μ s at a maximum amplitude of 50 dB. The C-scan ultrasound image has a unique reflection that does not change even when the amplitude cursors vary. In case of the defect's presence in the form of corrosion pits and weld defects, the diffracted ultrasonic wave occurs at the edges of the defective steel. Welded defects are confined to the center of the plate. The ultrasound image shows a distribution resulting from different variations in amplitude and different acoustic impedances. The transverse propagation speed of ultrasound waves is modified, showing an increase due to the presence of these defects. The application of ultrasonic detection of surface defects, their nature, location and size are extended to online expertise using the intelligent ultrasonic tool in order to define a maintenance strategy.

Keywords API 5LX60 steel; Corrosion by soil; surface defects; TOFD ultrasound detection – C-Scan ultrasound detection; acoustic impedances

Résumé

Les aciers des pipelines sont sujets à des défaillances dues à la corrosion, ce qui pose des problèmes pour la fiabilité du transport par pipeline et pour l'environnement. Dans un premier temps, la thèse se focalise sur le comportement en corrosion des aciers API 5L X60 par les sols du gazoduc GZ1 en employant des méthodes électrochimiques et une solution de sol artificiel. Les échantillons ont été obtenus par coupons découpés dans des tubes corrodés obtenus lors des opérations de maintenance. La deuxième étape est la détection des défauts de surface à l'aide des techniques ultrasons TOFD et C-Scan. Il a été montré par les résultats potentiodynamiques que l'acier est susceptible de se corroder par le sol lorsque la protection est défaillante accentuée par les sols à faible résistivité et le pH, la composition chimique, la teneur en eau, les contraintes mécaniques, etc. Les caractéristiques mécaniques diminuent en fonction de la durée d'immersion. Cette réduction est principalement due à l'effet de corrosion et à la durée d'immersion qui est à l'origine d'une dégradation directe des caractéristiques mécaniques de l'acier. La détection de surface des défauts par méthode ultrasonique sans contact TOFD et par immersion ultrasonore C-Scan a montré que l'onde ultrasonore diffractée se produisant aux bords des défauts n'apparaît pas en l'absence de défauts. Le signal reste stable à tout moment de 0 à 138,2 μ s à une amplitude maximale de 50 dB. L'image ultrasonique C-scan présente une réflexion unique qui ne change pas même lorsque les curseurs d'amplitude varient. En cas de défauts sous forme de piqûres de corrosion et de défauts de soudure, l'onde ultrasonore diffractée se produit sur les bords de l'acier défectueux. Les défauts de soudure sont confinés au centre de la plaque. L'image ultrasonique montre une distribution résultant de différentes variations d'amplitude et de différentes impédances acoustiques. La vitesse de propagation transversale des ondes ultrasonores est modifiée, montrant une augmentation due à la présence de ces défauts. L'application de la détection par ultrasons des défauts de surface, leur nature, leur localisation et leur taille est étendue à l'expertise en ligne en utilisant l'outil ultrasonique intelligent afin de définir une stratégie de maintenance.

Mots-clés Acier API 5LX60 ; Corrosion par le sol ; défauts de surface ; Détection par ultrasons TOFD – Détection par ultrasons C-Scan ; impédances acoustiques

ملخص

يتعرض فولاذ خطوط الأنابيب للفشل بسبب التآكل مما يشكل مشاكل بالنسبة لموثوقية النقل والبيئة. تركز الأطروحة في المقام الأول على سلوك تآكل الفولاذ باستخدام تقنيات الكهروكيميائية ومحلل التربة الاصطناعي. تم الحصول على العينات عن طريق كويونات مقطوعة من أنابيب متآكلة تم الحصول عليها أثناء عمليات الصيانة. والخطوة الثانية هي اكتشاف العيوب السطحية باستخدام تقنيات الموجات فوق الصوتية. أظهرت النتائج الديناميكية المحتملة أن الفولاذ حساس للتآكل بسبب التربة عندما تفشل الحماية، ويبرز ذلك بسبب انخفاض مقاومة التربة، ودرجة الحموضة، والتركيب الكيميائي، ومحتوى الماء، والضغوط الميكانيكية، وما إلى ذلك. وتتناقض الخاصية الميكانيكية اعتمادًا على مدة الغمر. يرجع هذا الانخفاض بشكل رئيسي إلى تأثير التآكل ومدة الغمر وهو سبب التدهور المباشر للخصائص الميكانيكية للصلب. كشف سطح العيوب لموجات فوق الصوتية غير التلامسية وبواسطة الغمر بالموجات فوق الصوتية أظهر أن الموجة فوق الصوتية المنحرفة التي تحدث عند حواف العيوب لا تظهر في غياب العيوب. تظل الإشارة مستقرة في جميع الأوقات. تحتوي صورة الموجات فوق الصوتية للمسح على انعكاس فريد لا يتغير حتى عندما تختلف مؤشرات السعة. في حالة وجود العيوب على شكل حفر تآكل وعيوب لحام، تحدث موجة فوق صوتية منحرفة عند حواف الفولاذ المعيب. تقتصر العيوب الملحومة على وسط اللوحة. تُظهر صورة الموجات فوق الصوتية توزيعًا ناتجًا عن اختلافات مختلفة في السعة وممانعات صوتية مختلفة. تم تعديل سرعة الانتشار العرضي للموجات فوق الصوتية، فتظهر زيادة بسبب وجود هذه العيوب. يمتد تطبيق الكشف بالموجات فوق الصوتية عن عيوب السطح وطبيعتها وموقعها وحجمها إلى الخبرة عبر الإنترنت باستخدام أداة الموجات فوق الصوتية الذكية من أجل تحديد إستراتيجية الصيانة.

الكلمات المفتاحية:

التآكل بالتربة- عيوب السطح -موجات فوق الصوتية- - الكشف بالموجات فوق الصوتية

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

*L*a demande croissante en énergie, telles que les énergies fossiles, le gaz naturel et les produits pétroliers, nécessite l'utilisation de pipelines en acier pour leur transport sur de longues distances, depuis leurs gisements jusqu'aux zones de raffinage et aux centres de distribution et de consommation. On estime qu'en Algérie le réseau de pipelines est à plus de 20 705 Kms tout diamètre confondu [1] est en plein expansion par la construction de nouvelles lignes de pipelines. Le pipeline est une canalisation en acier pouvant supporter jusqu'à 100 bars, il est utilisé pour le transport à moyenne et grande distance des hydrocarbures liquides et gazeux.

Son expansion est marquée non seulement par une augmentation des distances mais aussi par une augmentation des diamètres. Le transport par canalisation est favorisé par :

- L'acheminement des produits d'hydrocarbures sous la forme liquide et gazeuse facilitant le transport
- Des pertes d'énergie minimales,
- Le tracé pouvant être effectué en autorisant les cultures

Afin d'assurer un transport fiable des hydrocarbures par canalisation, un programme de maintenance des tubes doit être établi pour préserver la sécurité des populations, l'environnement et limiter les pertes financières dues à l'arrêt de l'exploitation lors du remplacement de conduites et des travaux de réparation.

Il existe plusieurs méthodes de détection et de réparation des tubes endommagés comme les méthodes de détection non destructives particulièrement les méthodes aux ultrasons et les méthodes de réparation telle que le collage par patch ou par Clock Spring à plusieurs couches jusqu'à huit couches qui contribue à renforcer le pipeline de transmission à haute pression et lui redonner toute sa résistance.

Dans cette étude, nous examinerons comment se comportent en corrosion les aciers API 5LX60 de la ligne GZ1 exploitée par la société Sonatrach. Il s'agit d'une ligne du réseau de pipelines appelé route multiple qui transporte du gaz naturel de Hassi R'mel vers la zone industrielle d'Arzew sur une distance de 507 km. Elle a été mise en exploitation en 1976. Cette ligne traverse les villes de Laghouat, Tiaret, Relizane et Arzew sur son tracé. Il s'agit d'une ligne incrustée de 0,6 à 1 mètre de profondeur. La ligne traverse cinq stations de compression (SC) afin de maintenir la pression tout au long de son parcours.

La ligne est composée de tubes en acier soudés de type roulé. Un revêtement épais au liant bitumineux est appliqué sur le chantier pour les protéger des agressions extérieures telles que la corrosion et les courants vagabonds. Cette protection est combinée à un système de protection cathodique active (PC) avec un potentiel minimum de -850 mV Cu/CuSO₄, afin d'isoler l'acier de l'environnement du sol et d'éviter tout risque de dégradation par corrosion ou fissuration. Les aciers présentent une limite élastique élevée et un alliage faible (HSLA). On les fabrique en utilisant un procédé métallurgique contrôlé basé sur le refroidissement accéléré (TMCP - Thermo Mechanical Controlled Process [1]) qui affine la taille des grains ferritiques en utilisant différents mécanismes de durcissement basés sur le mouvement des dislocations, ce qui accroît leur limite d'élasticité et leur durabilité.

La composition chimique et les caractéristiques mécaniques doivent répondre aux exigences spécifiées et aux critères d'acceptation selon les normes API [2]. La composition chimique est spécifiée comme la limite maximale de quatre éléments, carbone, manganèse, phosphore et soufre, utilisés pour les tubes soudés. Les caractéristiques mécaniques sont spécifiées comme valeurs maximales de la limite élastique (R_e) comme valeur résistant à la déformation et la résistance à la rupture en traction (R_m) après allongement (A%) jusqu'à rupture.

La ligne après plus de trente ans de service, présente des défaillances de surface par corrosion avec une perte de métal dans différents sites comme les défauts externes de surface (piqûres de corrosion, fissures, défauts de joints de soudure, etc.

Sonatrach /TRC a fait appel à des spécialistes de l'inspection des canalisations afin d'évaluer l'état de la ligne et de prendre les mesures appropriées. En 2004, [3] une inspection spécialisée a été réalisée par des experts canadiens du "groupe limited Canada" (PII) sur le tronçon de la ligne reliant la station de compression SC2 Oued M'Seka (W. Laghowat) à SC3 Medarregh (W.Tiaret). Cette inspection a été réalisée en utilisant l'outil intelligent Magne Scan HR pour mesurer l'épaisseur des parois à l'aide d'un sondage ultrasonique. L'instrument évalue l'épaisseur de la paroi de la conduite en se référant au temps de réflexion ultrasonique renvoyé par la surface interne de la conduite (écho d'entrée) et à celui de l'écho renvoyé par la surface externe de la conduite (écho sur la paroi). Plus de 93,6 % de tous les défauts détectés étaient des défauts de corrosion.

Il est important de prendre en considération les problèmes liés à la fiabilité et à la sécurité écologique lors de l'expansion du réseau de pipelines. Les canalisations, qui utilisent principalement de l'acier non allié comme matériau constituant, sont particulièrement vulnérables à des problèmes de défaillance, notamment en raison de la corrosion, que ce soit en raison de leur environnement (tubes enterrés) ou de leur fonction (transport de fluides corrosifs). Parmi les répercussions : la création de pics de corrosion, la rupture sous pression ; la fuite de liquides et l'interruption prolongée d'unités de production importantes. Les causes de la corrosion, qui représentent 84%, sont liées à des facteurs technologiques et peuvent se manifester sur l'acier dans certaines circonstances, comme le détachement des revêtements, l'insuffisance ou l'absence de protection cathodique, ainsi que l'agressivité du sol. D'après des études, 90% des ruptures dans les canalisations sous pression sont causées par des concentrations de contraintes dans le voisinage d'un défaut. Ces imperfections sont classées

en cinq catégories : les cratères de corrosion, les fissures, les éraflures, les enfoncements et les imperfections dites combinées (enfoncement + éraflure) causées par différentes sollicitations externes : Les contraintes mécaniques, telles que le frottement, l'abrasion, l'érosion, ainsi que les risques environnementaux tels que la corrosion, l'oxydation et la chaleur, mettent en péril la fiabilité et la sécurité potentielle de l'environnement, ainsi que la vie humaine.

Les fissures peuvent être les conséquences d'une pique de corrosion et se propager par suite de sollicitations conduisant à la fuite. Des études récentes [4] ont montrés que 49.6 % des défaillances de pipelines sont causées par des agressions externes.

L'étude dans le cadre de cette thèse comporte dans une première partie l'étude sur le comportement des aciers de pipelines en corrosion en simulant le contexte industriel par la reconstitution d'une solution de sol et les tests électrochimiques en laboratoire pour évaluer la sensibilité de l'acier au carbone lorsque la protection fait défaut et l'effet de paramètres influant comme le pH du sol, la température, la durée d'immersion et l'influence des contraintes mécaniques afin de mieux comprendre les mécanismes de corrosion de l'acier par le sol et l'influence de ces paramètres. Le processus de corrosion de l'acier par les sols implique de nombreux paramètres physico-chimiques tels que la composition du sol, la résistivité du sol et la composition chimique de l'acier. C'est le résultat de l'interaction électrochimique entre l'acier et l'environnement du sol, revenant à la forme oxydée plus thermodynamiquement stable. Ce sont les principales menaces qui peuvent nuire à l'intégrité sous-jacente du réseau de transport des pipelines. Le profil de corrosion est la conséquence de la défaillance de revêtements ne disposant pas d'une protection cathodique adéquate, dont les principales causes sont des sols défectueux. Les effets de cette corrosion se traduisent par des pertes d'épaisseur à différentes profondeurs, pouvant entraîner des perforations et des fuites de gaz.

Dans une deuxième étape de rechercher les méthodes adéquates pour la détection des défauts de surface externe comme les piques de corrosion et les défauts de soudures par les techniques non destructives. Des recherches récentes ont confirmé le développement des méthodes d'émission acoustique et des méthodes ultrasonores. Elles permettent de capter l'énergie élastique libérée par les mécanismes d'endommagement au sein des matériaux. Le suivie par émission acoustique est une méthode ultrasonore qui présente l'avantage d'être une méthode de contrôle non destructif des matériaux qui contribue à une meilleure compréhension des phénomènes complexes de la propagation linéaire et non linéaire dans les milieux solides.

La conception de la recherche présentée dans cette thèse a été motivée par les problèmes de corrosion des sols rencontrés dans le transport de gaz par des conduites enterrées en acier, où la corrosion représente la principale menace. L'étude a été réalisée en simulant un sol agressif à l'aide d'une solution de sol artificiel reconstitué chimiquement choisie comme composition de sol la plus corrosive afin d'en comprendre les mécanismes et de proposer des solutions. L'étude considérera l'influence de certains paramètres d'influence tels que les caractéristiques du sol, le pH, la température, la teneur en eau et les contraintes mécaniques. Des techniques électrochimiques seront utilisées pour déterminer les paramètres électrochimiques. Le but de

cette investigation est de mieux comprendre les phénomènes de corrosion liés à l'interaction de l'acier nu avec le sol. La recherche de solutions pour la détection des anomalies de surface causées par la corrosion à l'aide de méthodes non destructives telles que les ultrasons et à démontrer l'applicabilité et l'efficacité des méthodes. Nous utiliserons la méthode d'émission ultrasonique C-scan et la méthode de test ultrasonique TOFD pour localiser les défauts de surface de l'acier pour déterminer leur taille et leur emplacement à l'aide d'échantillons d'acier contenant des défauts de surface artificiels qui ont été analysés en laboratoire d'acoustique. L'objectif de cette partie d'investigation est de confirmer la détection rapide et précise de la méthode ultrasonique, qui fournit des méthodes de réparation adaptées et des solutions anticorrosion adéquates pour permettre une remise en service rapide.

L'étude expérimentale sur la corrosion a été effectuée au centre de recherche et développement CRD de la Sonatrach à Boumerdes et l'étude expérimentale sur la détection acoustique au laboratoire de recherche en acoustique LAUME (LE MANS), France.

La thèse est structurée en quatre chapitres. En introduction est présentée la description du sujet, le problème du contexte industriel et du transport par pipelines et la maintenance, les méthodes d'étude électrochimique en laboratoire et les méthodes de détection des défauts de surface.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les aciers de pipelines, leur comportement en corrosion et les défaillances susceptibles (défauts de soudure et les défauts de corrosion) et les méthodes de leur détection, On présentera les principaux défauts responsables de défaillances des canalisations ainsi que les outils et les méthodes développées pour chaque cas.

Dans le second chapitre nous présenterons le contexte industriel avec une description de la ligne GZ1 en définissant tous les types de défauts détectés ainsi les méthodes de détection pour protéger les aciers de pipelines.

Le troisième chapitre est une étude expérimentale ; matériels d'études, caractérisations chimique et microstructurale de l'acier X60, les tests de traction mécanique, les tests acoustiques C- Scan et TOFD sur l'échantillon prélevé a la ligne GZ 1 lors des opérations de maintenance.

Le quatrième chapitre sera consacré aux différentes discussions sur les résultats obtenus des différents tests menés aux laboratoires

Nous terminerons cette thèse par une conclusion sur les principaux résultats et les perspectives à envisager

CHAPITRE 1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I - Introduction

L'acier est utilisé dans de nombreuses installations industrielles en raison de ses avantages de propriétés physiques, chimiques et mécaniques. On l'emploie pour fabriquer des tuyaux de pipelines destinés au transport des hydrocarbures (Pétrole brut, Condensat, Gaz Naturel et Gaz Pétrole Liquéfié). C'est un alliage de fer à faible pourcentage en carbone (de 0,008 à environ 2,14 % en masse). additionné d'un faible pourcentage d'autres éléments, principalement métalliques pour modifier les propriétés. L'acier pour son utilisation doit posséder des caractéristiques mécaniques requises comme la résistance aux efforts : module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique, dureté et résistance aux chocs (résilience). Les pipelines (gazoducs et oléoducs) sont construits à partir de toles d'acier afin de transporter les hydrocarbures sur de longues distances depuis leurs gisements vers les zones de consommation et de transformation. Le transport et la distribution constituent l'un des éléments clés de l'industrie pétrolière.

L'augmentation de la pression sur les lignes de transport pour des raisons économiques a pour conséquence des dommages pouvant être permanents et un dysfonctionnement comme le déclassement des réservoirs et des pénuries de produits pétroliers, entraînant des coûts supplémentaires et une pollution de l'environnement. Il est essentiel d'utiliser des aciers de plus en plus résistants et aux caractéristiques distinctives afin d'améliorer la rentabilité des lignes de pipelines. Cela inclut les caractéristiques mécaniques et microstructurales des aciers utilisés pour la fabrication des tubes, les méthodes de détection des défauts, ainsi que l'amélioration des systèmes de protection. Il est important de prendre en compte les réactions électrochimiques de l'acier du pipeline avec l'environnement du sol, ce qui peut être amplifié lorsque d'autres paramètres sont pris en compte, tels que les sollicitations mécaniques et microbiologiques. On estime qu'il y a environ un million de kilomètres de pipelines en exploitation à travers le monde. En Algérie, le réseau est estimé à plus de 20 705 km, avec des diamètres variant de 8 à 48 pouces en moyenne. Ces canalisations doivent satisfaire à des exigences de rentabilité et de sécurité afin d'être efficaces. Plus de 95% des aciers employés dans le domaine des canalisations sont des aciers micro alliés à grande solidité. Les schémas métallurgiques de plus en plus avancés permettent d'augmenter la vitesse de refroidissement après un laminage contrôlé, tels que les tôles TMCP (thermo mechanical controlled process) sont obtenues par un laminage à température contrôlée suivi d'un refroidissement accéléré.

Il est important de considérer l'étude du comportement des conduites enterrées comme un phénomène physico-chimique. Il est important d'analyser le comportement des conduites enterrées en prenant en compte les caractéristiques mécaniques du matériau et le mécanisme de corrosion du métal, qui est un phénomène électrochimique. L'agressivité des sols est influencée par divers paramètres tels que la nature minéralogique du sol, l'aération, la teneur en humidité...

La corrosion et les ruptures peuvent se produire dans les aciers de pipelines, tant à l'intérieur comme : contraintes mécaniques, fatigue, fluage...; qu'à l'extérieur comme :

fortement, abrasion, température, érosion..., ou par l'environnement : corrosion, oxydation, attaque chimique

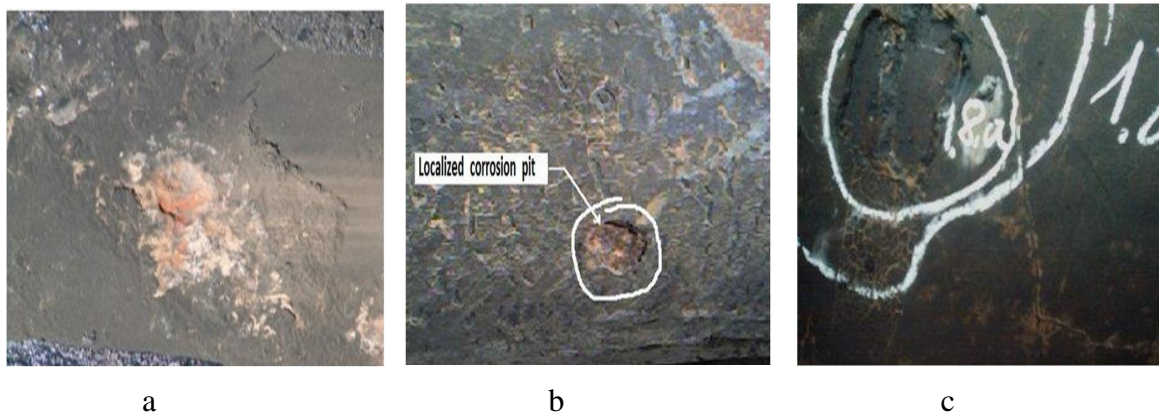


Figure 1 Cas de défaillance par corrosion externe dans l'acier de pipeline API5LX60 (a – propagation de la corrosion en surface après décollage du revêtement bitumineux, b – piqure de corrosion c- détachement du revêtement bitumineux

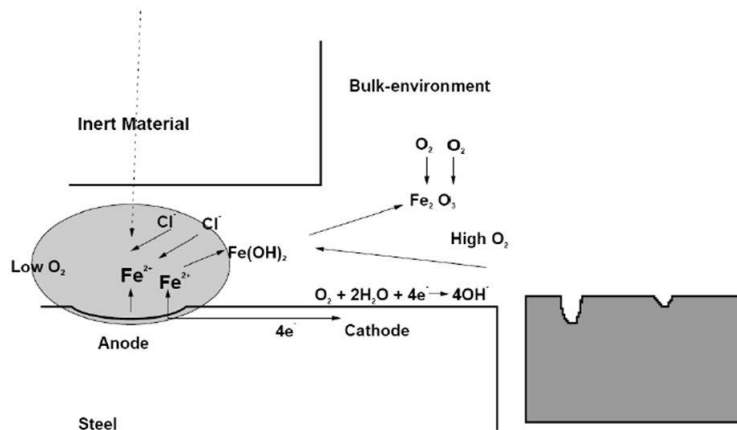


Figure 2 Mécanisme de formation de piqure de corrosion lors de l'interaction de l'acier de pipeline avec les sols

La détection des défauts d'acier est un autre problème à considérer qui se définit comme une mise en évidence d'une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriétés physico-chimiques préjudiciable au bon fonctionnement comme une porosité, fissure, défaut de corrosion défaut liés à des soudures. Vu la complexité à la variation de défaut liés aux conditions de service et les défaillances, de nombreux travaux ont étudié l'évaluation des défauts pour déterminer la présence, l'identification, la taille, l'emplacement de défaut. Dans la littérature différentes catégories de défaut ont été établies où la classification peut se faire suivant un ou plusieurs critères choisis (emplacement nature, taille) on trouve deux grandes catégories : défauts externes ou défauts de surface et défauts internes. D'autres défauts apparaissent en cours de service comme les fissures (mécanique ou thermique), défauts de fixation, corrosion ou défauts générés comme les défauts de forme, d'inclusions, de porosités, de fissurations, de moulage, de soudage d'hétérogénéités dans les matériaux.

La détection des défauts se fait par contrôle non destructif (CND) qui consiste à évaluer l'état d'un système, d'une structure ou d'un matériau sans l'endommager en vue d'établir un diagnostic. Les tests de CND sont pour la plupart fondés sur l'observation et l'exploitation d'un phénomène physique perturbé par la présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité. Les techniques utilisées sont diverses et dépendent de la nature même de la détection envisagée. Sur une large gamme de fréquence les ondes électromagnétiques permettent d'effectuer des contrôles non destructifs. Les applications de l'imagerie électromagnétique sont nombreuses : la détection de l'endommagement d'un élément de centrale nucléaire, la localisation de masses métalliques dans des structures en béton, la disposition de tuyaux enterrés.. Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. Les techniques du CND sont nombreuses et diffèrent par l'énergie employée : énergie mécanique (ultrasons), électromagnétique (courants de Foucault, ou thermique.)

La détection par ultrasons est utilisée dans de nombreux système et structure. Ce sont des ondes mécaniques qui se propagent dans les milieux élastiques. Lorsque ces ondes rencontrent une interface entre deux milieux de nature différente de celle du milieu de propagation, il y a réflexion de tout ou partie de l'onde incidente. L'énergie réfléchi est captée en surface par l'élément (transducteur) qui lui a donné naissance. Cette énergie mécanique transformée en signal électrique, engendre sur un oscilloscope, une déflexion de la trace horizontale. La position de la déflexion de la trace va permettre de localiser l'interface réfléchissante. Le transducteur ultrasonique utilise l'effet piézoélectrique pour convertir l'électricité en vibration mécanique et former des ondes ultrasoniques.

I -1 Défaillances des aciers de pipeline par corrosion

I -1-1 Aciers de pipelines

Les aciers utilisés dans les pipelines sont fabriqués en respectant les normes de qualité, telles que la norme API 5L (American Petroleum Institute). Une des conditions requises du cahier des charges pour l'acier pour pipeline est d'obtenir un compromis dans les propriétés mécaniques, telles que la limite d'élasticité maximale, la ténacité, la soudabilité et une résistance à la corrosion.

L'acier est produit selon un schéma métallurgique contrôlé par refroidissement accéléré en affinant la taille des grains ferritiques, ce qui a pour conséquence l'augmentation de la limite d'élasticité et la ténacité. Ils sont obtenues par divers mécanismes de durcissement basés sur le mouvement des dislocations. L'acier de part sa composition chimique et ses caractéristiques mécaniques doit répondre aux exigences spécifiées et aux critères d'acceptation selon les normes API. Pour répondre à ces exigences la classe des aciers dits (HSLA) (High Strength low Alloy Steels) a été développée récemment. Ce sont des alliages d'aciers à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone et contient certains autres éléments introduits en faible quantités au moment de leur élaboration. Ces aciers à bas teneur en carbone et micro - alliés sont de microstructure ferrito-perlitiques

Les aciers pour pipeline sont fabriqués en Algérie à l'usine sidérurgique d'Annaba par la société Arcelor Mittal. Il s'agit d'aciers avec une grande résistance à la rupture et une résistance à basse température avec une épaisseur importante. Ils sont très soudables, dû à une composition chimique appropriée (valeur particulièrement faible de leur carbone équivalent).

I-1-2 Corrosion par les sols

Les phénomènes de corrosion des aciers de pipelines enterrés se produisent suite à l'interaction de l'acier avec les sols par suite du détachement des revêtements ou des défaillances de la protection cathodique mettant l'acier à nu au contact avec le sol.

L'échange entre l'acier et le sol diffère de celui d'un électrolyte liquide. Le sol est un environnement abondant en minéraux de différentes tailles et relativement peu humide. Les théories et les lois régissent la corrosion des métaux dans les électrolytes, tandis que dans les sols, la corrosion prend en considération l'environnement. La corrosion est perçue comme un phénomène qui varie en fonction du type de milieux environnants... Les sols ne sont pas des environnements uniformes. Ces environnements présentent une grande variété (compositions, humidité, perméabilité, concentrations en sels et gaz dissous).

On peut définir la corrosion comme la destruction des matériaux par leur environnement, tels que les facteurs chimiques, électrochimiques, microbiologiques ou mécaniques. Les métaux ont tendance à revenir à leur état naturel d'oxyde, de sulfate, de carbonate... une forme plus stable par rapport au milieu corrosif, ce qui entraîne une détérioration de leurs propriétés. Le terme "corrosion" provient du latin "corrodere" qui signifie "ronger". On la définit aussi comme l'interaction physico-chimique entre un métal et son environnement, ce qui entraîne des changements dans ses propriétés et une détérioration fonctionnelle du métal concerné.

Le sol est composé d'éléments minéraux et en quantités minoritaires des éléments organiques. Les éléments minéraux peuvent se présenter suivant leur granulométrie pouvant être grosse comprise entre 2 μm et 2 mm ou fine inférieure à 2 μm . Les argiles minéralogiques se trouvent dans la partie fine. La granulométrie d'un sol est un paramètre à considérer dans la classification des sols [5]

Tableau 1 Classification des constituants de sol suivant leur taille [5]

Groupe	Diamètre (mm)
Graviers et pierres	>2
Graviers fins	1-2
Sable	0.05 -1
Limon	0.002 -0.05
Argile	<0.002

Une représentation graphique triangulaire texturale ou triangle de Jamagne [5] permet de déterminer les classes de textures en fonction de leur dimension (Figure 3). La texture joue un rôle dans les propriétés du sol telles que l'aération, le lessivage et la perméabilité. La combinaison des diverses tailles de particules donne à un sol des caractéristiques distinctes.

Un sol sableux a tendance à être plus aéré qu'un sol limoneux puisque les pores entre les particules sont plus gros. Pour un sol limoneux, si la part de particules fines est importante, celles-ci vont colmater les interstices et rendre le sol moins aéré et moins perméable. La teneur en oxygène d'un sol est légèrement inférieure à celle de l'atmosphère de la surface et baisse lors de périodes de pluies. Le pH dans les sols varie de manière macroscopique entre 3 et 9,5.

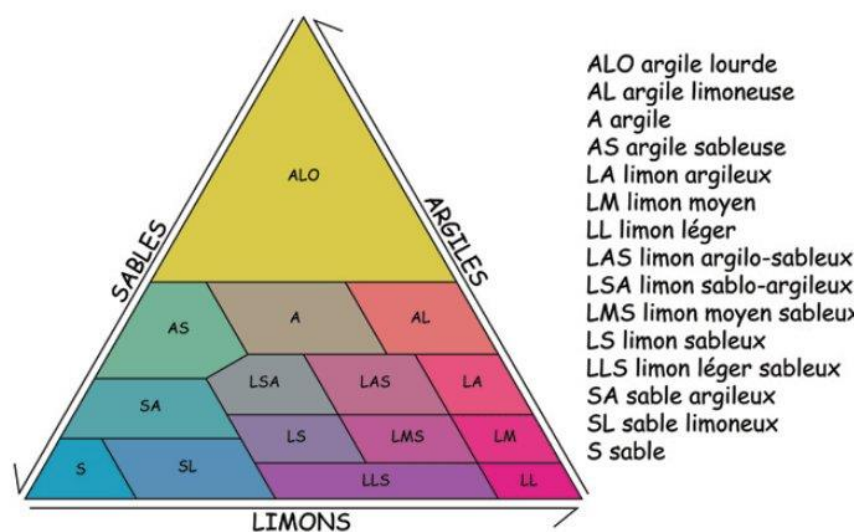


Figure 3 Diagramme de classification des textures de sol (JAMAGNE, 1976).[5]

On évalue la corrosion par le sol en prenant en considération différents facteurs qui influencent la corrosion, tels que la résistivité, la composition du sol, le pH, la température, l'humidité et le temps d'exposition. D'après des études, les sols à faible résistivité sont des sols extrêmement corrosifs. La présence d'humidité et de molécules H_2O , la présence de sels solubles facilitent le passage du courant, ainsi que la présence de microorganismes tels que les bactéries, qui favorisent la réduction des sulfates et accroissent les processus de corrosion, contribuent à accentuer la corrosion.

Le taux d'humidité entraîne une augmentation de la corrosivité du sol [6], jusqu'à atteindre une valeur limite à partir de laquelle la corrosivité commence à diminuer (Figure 4). La corrosivité est critique lorsque le taux d'humidité est compris entre 25 et 35% en masse d'eau, avec un ratio air/eau favorable dans le sol où la corrosivité est maximale. La corrosion est ralentie dans les sols saturés en eau ou très secs, où la vitesse de corrosion est restreinte par la vitesse de diffusion de l'oxygène dans l'électrolyte.

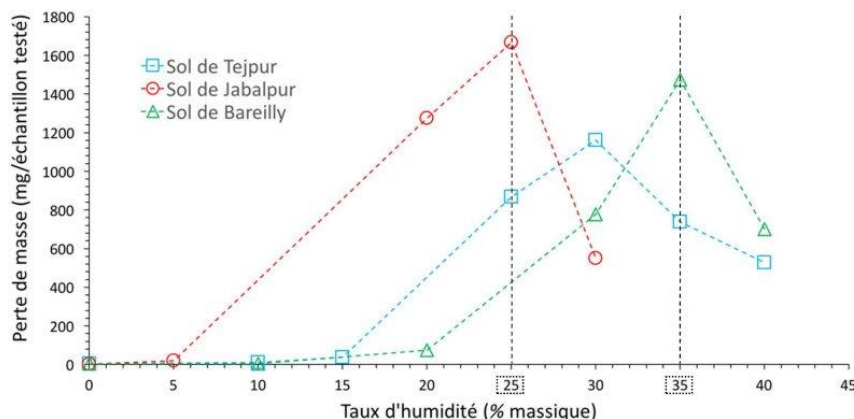


Figure 4 Relation entre corrosivité des sols et de leur taux d'humidité [6]

La résistivité est un paramètre influant de la corrosion par les sols. À mesure que la résistivité du sol ρ diminue, le sol est considéré comme plus agressif (corrosif). Cela s'explique par le fait qu'une faible résistivité facilitant le déplacement des charges, ce qui entraîne un flux de courant accru. [7] La corrosivité du sol se réfère à sa capacité à causer une corrosion plus ou moins rapide d'un métal spécifique. La corrosion est favorisée par différents facteurs tels que le niveau d'ionisation du métal, la réaction cathodique de réduction et la dissolution de certaines couches protectrices.

La salinité du sol, caractérisant sa salinisation correspond à la quantité de sels solubles. Elle peut avoir un impact sur la corrosion des sols. La salinisation est le processus pédogénétique qui requiert la présence d'une source de sels solubles dans un climat évaporant.

Tableau 2 La relation entre la résistivité du sol et la corrosion [7]

Résistivité du sol $\rho(\Omega.cm)$	Concentration en sel Mg/l	Corrosivité	Vitesse de corrosion μ/ans
$< 10^2$	> 7500	Très élevée	> 100
$10^2 - 10^3$	$7500 - 750$	Elevée	$100 - 30$
$10^3 - 10^4$	$750 - 75$	Faible	$30 - 4$
$> 10^4$	< 75	Très faible	> 4

I.2 Evaluation de la corrosion des aciers de pipelines par les sols

Le comportement du fer et de ses alliages dans les sols dépend de leurs caractéristiques et de l'aération du milieu acide. Dans un environnement acide et bien aéré, le fer se présente sous la forme d'hydroxydes de fer III et reste lié au complexe argilo-humique où il migre avec les particules d'argile en cas de lessivage. Une partie du fer est transformée en espèces de fer (II) dans un milieu acide mal aéré et se sépare de l'argile. Les ions Fe^{2+} sont complexés par les composés organiques solubles, qui les rend solubles à des pH où ils ne seraient pas normalement solubles.

Selon la littérature, plusieurs méthodes ont été développées pour étudier la corrosion des métaux dans divers milieux corrosifs : la méthode gravimétrique ou perte de masse (Weight loss), les méthodes électrochimiques stationnaire comme la polarisation potentio-dynamique et la voltampérométrie cyclique et les méthodes transitoires comme la spectroscopie d'impédance électrochimique. D'autres méthodes ont été développées comme les méthodes thermiques.

I-2-1 Méthode gravimétrique (weight loss)

La méthode gravimétrique, également appelée méthode de perte de poids ou "weight loss", est une méthode ancienne qui permet de mesurer la différence de masse entre les échantillons avant et après l'exposition de la surface S du métal à un milieu corrosif pendant un temps spécifique t . Il s'agit d'une méthode peu précise qui ne permet pas d'analyser les mécanismes impliqués dans la corrosion.

L'analyse gravimétrique fait référence à un ensemble de techniques d'analyse chimique quantitative qui consiste à déterminer la masse d'un produit formé ou éliminé en utilisant une balance analytique de grande précision. Cette exactitude désigne la proximité d'une mesure avec la valeur réelle qui est la mesure la plus exacte de la quantité mesurée, et le degré de précision est calculé en comparant les mesures à un étalon connu ou à une référence, et toute différence peut être corrigée en ajustant la balance en conséquence. Les balances analytiques sont très précises, capables de mesurer jusqu'à 0,1 mg ou plus. Différents éléments peuvent influencer la précision d'une balance analytique, tels que la température, les courants d'air, les vibrations et les champs électromagnétiques. C'est la raison pour laquelle la balance doit être régulièrement ajustée et utilisée dans un environnement contrôlé afin d'assurer la précision des mesures.

La perte de masse Δm (mg), la vitesse de corrosion et le taux de corrosion sont exprimées par les relations suivantes :

$$\Delta m = m_0 - m_1 \quad (1)$$

m_0 —masse initiale

m_1 - masse finale

La vitesse de corrosion (V) est déterminée par l'équation suivante :

$$V = \Delta m / S \cdot t \quad (2)$$

S - surface exposée en cm^2

t - Temps d'exposition dans la solution corrosive en heure

Le taux de corrosion (θ) est exprimée par la relation suivante :

$$\theta = K \cdot \Delta m / S \cdot t \cdot d \quad (3)$$

K – contante $8,76 \times 10^4$ (pour unités en mm/an)

d - densité de l'acier en g/cm^3

I-2-2 Méthodes électrochimiques

Les méthodes électrochimiques en corrosion ont pour but d'évaluer et de contrôler la corrosion. Grâce aux méthodes stationnaires, il est possible d'analyser les modifications chimiques et les échanges de charge en identifiant les espèces adsorbées et en estimant leur concentration. Il est nécessaire d'utiliser des techniques de régulation et d'analyse dynamique des grandeurs pour comprendre les processus fondamentaux de la corrosion (transport de matière, réactions chimiques et électrochimiques), afin de réguler l'état de l'interface entre le métal et le milieu agressif. Cela implique l'utilisation de techniques non stationnaires appelées relaxation. Il est insuffisant d'utiliser des méthodes stationnaires pour étudier des mécanismes complexes qui impliquent plusieurs étapes réactionnelles et qui ont des cinétiques caractéristiques différentes, comme c'est le cas lors des processus d'inhibition. Cela nécessite donc de compléter les études en utilisant des méthodes transitoires.

Les techniques stationnaires permettent d'établir le bilan des transformations chimiques et des échanges de charge au moyen ; identification des espèces adsorbées et estimation de leur concentration superficielle . Les techniques non-stationnaires permettent d'évaluer la vitesse des transformations entre les espèces complètera l'évaluation du processus de corrosion dans un système donné.

Les essais électrochimiques sont réalisés dans une cellule électrochimique à trois électrodes (Figure 5) en double paroi permettant la circulation d'un liquide caloporteur assurant une température constante au cours des essais. Un bain thermostaté régule la température de la solution. Le couvercle de la cellule est équipé de cinq orifices rodés qui permettent l'insertion de trois électrodes : l'électrode de référence, l'électrode auxiliaire ou contre électrode et l'électrode de travail.



Figure 5 Dispositif de mesures électrochimiques a) Système d'acquisition b) Potentiostat – galvanostat c) Cellule électrochimiques d) Bain thermostaté

On évalue le potentiel de l'électrode de travail par rapport à celui de l'électrode de référence, qui doit rester constant tout au long des mesures et doit se comporter principalement comme une électrode non polarisable. En général, l'électrode de référence est l'électrode à calomel saturé en KCl (ECS / KCl_{sat}), avec un potentiel standard de + 0,235V /ENH. Dans les montages à trois électrodes, l'électrode auxiliaire sert à transmettre le courant faradique produit par la microélectrolyse de la solution vers le potentiostat-galvanostat. L'électrode de travail comporte la surface de la section de l'échantillon à analyser. La surface de l'électrode de travail est polie avant chaque essai avec un filet d'eau mince afin d'obtenir un poli spéculaire. On rince la surface polie avec de l'eau distillée, puis on la sèche et on la plonge immédiatement dans la cellule électrochimique contenant la solution électrolytique d'étude. Cette solution est aérée et agitée à l'aide d'un barreau aimanté entraîné par un agitateur magnétique.

Après avoir évalué la corrosion, il est important de prendre en compte d'autres paramètres tels que la recherche de méthodes de lutte telles que l'inhibition, les protections anodique et cathodique, ainsi que les revêtements. Les tendances de protection actuelles consistent à utiliser des produits naturels respectueux de l'environnement et favorables au développement durable.

1-2-3 Méthodes stationnaires

Les méthodes stationnaires offrent la possibilité d'analyser un système dans un état d'équilibre thermodynamique, en prenant en considération tous les couples rédox présents dans la solution.

Courbes de polarisation : également appelée courbes courant-tension stationnaires $\log i = f(E)$, permet d'évaluer la vitesse de corrosion et de comprendre la formation du film inhibiteur.

Courant de corrosion est déterminée de manière graphique en utilisant les courbes (i-E). En extrapolant la droite de Tafel, cathodique et/ou anodique, on obtient la valeur de l'intensité du courant de corrosion i_{corr} , qui correspond au potentiel de corrosion E_{corr} .

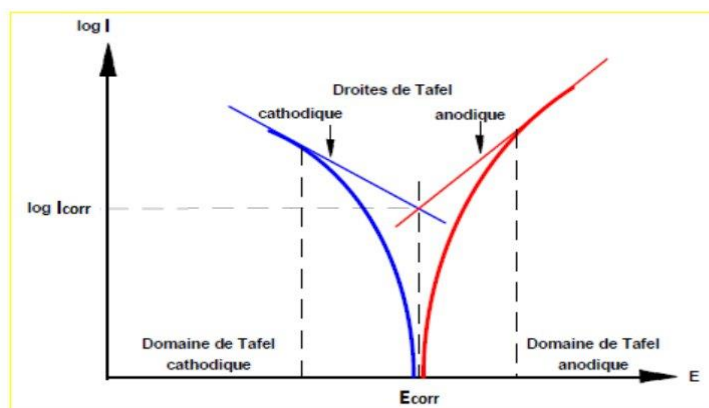


Figure 6 Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel

Résistance de polarisation R_p (Ω/cm^2): est inversement proportionnelle au courant de corrosion. En accroissant la résistance de polarisation, l'intensité du courant de corrosion diminue. Elle est exprimée par la relation suivante entre le courant et le potentiel.

$$R_p = \frac{1}{i_0} \frac{RT}{ZT} \quad (4)$$

Les techniques stationnaires sont complémentaires des méthodes non stationnaires ou transitoires comme les méthodes de spectroscopie d'impédance électrochimique pour caractériser des mécanismes complexes comportant plusieurs étapes réactionnelles et ayant des cinétiques caractéristiques différentes (comme c'est le cas lors des processus d'inhibition).

I.2.4 Méthodes non stationnaires ou transitoires

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) consiste à mesurer l'impédance électrochimique et étudier la réponse du système électrochimique, suite à une perturbation qui est, le plus souvent, un signal alternatif de faible amplitude. La force de cette technique est de différencier les phénomènes réactionnels par leur temps de relaxation. Quand la fréquence de l'application diminue, on constatera l'apport des étapes plus lentes, telles que les phénomènes de transport ou de diffusion en solution. En général, on présente les résultats de ces mesures sur un diagramme appelé diagramme de Nyquist (Figure 7).

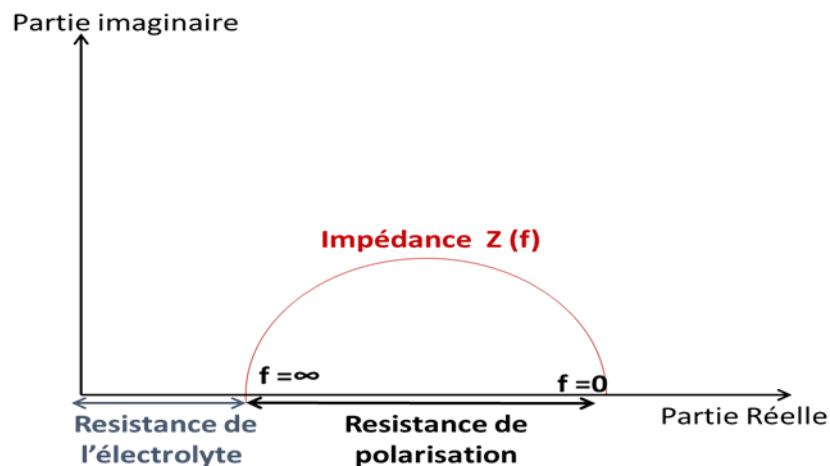


Figure 7 Représentation graphique d'un diagramme de Nyquist

1.2 Méthodes de détection des défauts dans les aciers

Les aciers de pipelines de part les recherches récentes sur l'amélioration de leurs propriétés adéquates à leur fonctionnement en améliorant leur composition chimique, leur microstructure et leur propriétés de résistance en élaborant des aciers performants ou les modifications de leur systèmes de protection et d'isolation, les ouvrages enterrées de tubes en acier de pipelines de part les conditions de leur utilisation sont exposées aux phénomènes de dégradation par corrosion, fissuration, perforation, détachement des revêtements, rupture...dont les mécanismes deviennent complexes lorsque d'autres sollicitations sont impliquées comme les sollicitations mécaniques, microbiologiques... En conséquence, la corrosion s'accroît même si l'acier est protégé à la fois par revêtement et par protection cathodique active.

1.2.1 Types de défauts dans les aciers

Les anomalies peuvent se produire tant à l'intérieur qu'à l'extérieur sous forme de corrosion localisée par piqûration ou fissuration le plus souvent par corrosion électrochimique ou par corrosion sous contrainte SCC (Stress Corrosion Cracking) ou induite par l'hydrogène par des mécanismes en mode ductile ou en mode par clivage en présence particulièrement des espèces chimiques OH^- , CO_3^{2-} / HCO_3^-

Une classification de catégorie de défaut a été établie suivant un ou plusieurs critères choisis (emplacement nature, taille) on trouve deux grandes catégories : défauts externes ou défauts de surface et défauts internes.

Un défaut peut être définie comme une mise en évidence d'une hétérogénéité de matière, une variation locales de propriétés physico-chimiques préjudiciable au bon fonctionnement comme une porosité, fissure, défaut de corrosion défaut liés à des soudures. Vu la complicité à la variation de défaut liés aux conditions de service et les défaillances, de nombreux travaux ont étudié l'évaluation des défauts pour déterminer la présence, l'identification, la taille, l'emplacement de défaut. Un défaut dans une matière représente physiquement une hétérogénéité de microstructure ou une modification de propriétés physiques ou chimiques.

Les défauts sont généralement divisés en deux catégories principales en fonction de leur localisation : les défauts de surface et les défauts internes.

- *Les imperfections externes ou superficielles*, visibles à l'œil nu mais par principe visibles à l'œil nu, peuvent être divisées en deux catégories : les imperfections ponctuelles et les imperfections d'apparence.

Les défauts ponctuels sont les défauts les plus préjudiciables sur le plan technologique, car ils incluent des criques, des piqûres, des fissures, des craquelures et des lacunes, qui peuvent entraîner la rupture du matériau. Les fissures de quelques μm peuvent être dangereuses en profondeur, ce qui requiert l'utilisation de méthodes non destructives plus efficaces pour leur détection.

Les défauts d'aspect, comme la rugosité, la surépaisseur... caractérisés par une variation de paramètres géométriques ou physiques peuvent être détectés par contrôle visuel ou contrôles optiques automatiques.

- *Les défauts Internes* comme les criques internes, les porosités, les soufflures, les inclusions, les lacunes... sont des hétérogénéités de formes et de dimensions localisées pouvant affecter des matériaux moulées, forgées, laminées, soudées.

1.2.2 Défaillances mécaniques des aciers de pipelines

En général, les pannes mécaniques surviennent dans les aciers de pipelines sous différentes formes :

- Croissance et la coalescence sous l'effet de la contrainte mécanique
- Rupture du matériau pouvant être ductile ou fragile.

Le type de rupture peut être déterminé en tenant compte du faciès de rupture. Lorsque des inclusions ou des fragments d'inclusions sont présents, cela suggère que l'amorçage est principalement causé par la présence d'hétérogénéités dans le matériau.

Les défauts de type mécanique pour leur apparition dépendent de plusieurs critères comme le type de sollicitations mécaniques, la microstructure du matériau et le type de paramètres physiques comme la température.

1.2.3 Types de ruptures :

En fonction du type de sollicitations mécaniques, les aciers utilisés dans les pipelines peuvent être vulnérables à des dommages causés par la déformation plastique ou la rupture. Les ruptures fragiles et les ruptures ductiles étant différentes, on a :

- *Rupture fragile*

La propagation rapide des fissures avec absence de déformation plastique sont les caractéristiques de la rupture fragile. Lorsque l'énergie de déformation locale causée par les sollicitations extérieures est égale à l'énergie de cohésion atomique, ce type de rupture intervient. La rupture causée par la fragilisation par hydrogène est une situation de rupture fragile qui peut survenir à des vitesses élevées en raison de l'application de la charge au choc et de la fatigue (le critère de Griffith permet donc d'évaluer la contrainte à réparer). Un autre type de rupture est la fragilisation par le froid...

Selon la littérature, deux types de ruptures fragile peuvent se manifester : La rupture transgranulaire (clivage) liée aux plans cristallographiques, et la rupture intergranulaire liée aux joints des grains [8]. Les faces de rupture cristalline sont brillantes lors de la rupture par clivage. On la retrouve dans les cristaux cubiques centrés comme les aciers au carbone.

La rupture fragile inter granulaire suit les joints des grains, elle est caractérisée par une décohésion inter granulaire ; elle survient par accumulation d'impuretés ou d'inclusions qui sont à l'origine d'une fragilité. La rupture inter granulaire se manifeste sous deux formes :

Rupture fragile à basses températures où l'énergie de cohésion des joints du grain diminue lorsque les impuretés sont ségréguées au niveau des joints, et rupture inter granulaire par fluage

aux températures moyennes et élevées ($T \geq 1/3$ Fusion). La cause de ce type de rupture est d'abord la présence de cavités, puis leur multiplication ou leur décohésion.

- **Rupture ductile**

Est caractérisée par une forte énergie de rupture, un faciès mat et fibreux et une déformation plastique importante. Elle est causée par l'émergence des cavités et leur allongement dans le sens de la déformation par striction ou cisaillement. On observe fréquemment la rupture par traction avec l'apparition de striction. Si des pipelines sont endommagés, certains problèmes tels que les inclusions, les précipitations et les joints de grain sont responsables de l'apparition de ce type de rupture.

1.2.4 Défaillances par déformation plastique dans les aciers de pipelines

La déformation plastique est une forme de dégradation irréversible se produisant par mouvement de défauts linéaires appelés dislocations sous sollicitations caractérisée par un glissement de plans atomiques dans le sens de la déformation. Selon les cas suivants, les mécanismes impliqués lors des déformations plastiques varient en fonction de la contrainte mécanique appliquée.

$\sigma < R_m$ L'augmentation de la densité des dislocations dans le matériau

$\sigma = R_m$ Les dislocations sont au maximum.

$\sigma > R_m$ Les liaisons atomiques se rompent et des microfissures apparaissent, ce qui entraîne la rupture du matériau.

1.2.5 Défaillances par fissuration

D'après le processus mécanique de rupture, l'apparition et la diffusion d'une fissure dépendent de l'état de contrainte et de déformation. Trois façons d'utiliser la force afin de permettre à une fissure de se propager :

Mode I, on observe une contrainte de traction normale sur le plan de la fissure,

Mode II, on observe une contrainte de cisaillement parallèle au plan de la fissure et perpendiculaire au front de la fissure,

Mode III, on observe une contrainte de cisaillement parallèle au plan de la fissure et parallèle au front de la fissure.

Les ruptures dans le cas des aciers de pipelines selon les rapports d'expertise se sont produites par suite de l'effet d'une charge limite ou par amorçage et propagation de fissure dans le cas d'une rupture fragile.

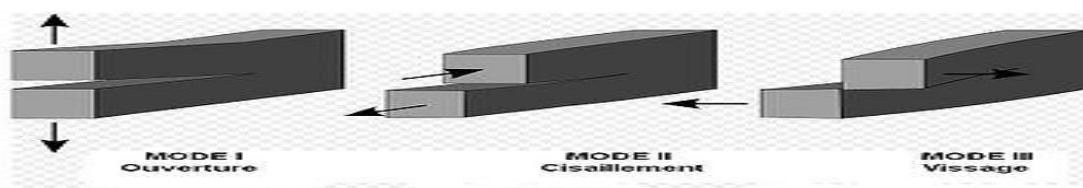


Figure 8 L'ouverture de la fissure en fonction de la mécanique de rupture [8]

1.3 Méthodes de détection des défauts (Techniques CND)

La détection des défauts sur les aciers de pipeline est à considérer pour rechercher les méthodes adéquates de détection. Selon la littérature [9 - 10] le Contrôle Non Destructif (CND), appelé également Essais Non Destructif ou Évaluation Non Destructive, est une discipline regroupant des procédés et techniques permettant de détecter, localiser, dimensionner, caractériser d'éventuels défauts et d'assurer la conformité et l'intégrité d'un matériau ou d'une pièce sans avoir à la détruire ou à l'altérer. Ils sont fondés sur l'observation et l'exploitation d'un phénomène physique perturbé par la présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité. Ils sont basés sur l'utilisation de capteurs dont le fonctionnement est basé sur les principes de la physique (électromagnétisme, rayonnements, propagation...). Les techniques utilisées sont diverses et dépendent de la nature même de la détection envisagée. Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité.

On distingue plusieurs techniques de détection par CND dont les principales sont : procédés optiques (examen visuel, contrôle optique automatique...), procédés à flux de fuite magnétique, Courants de Foucault, Radiographie (rayons X ou γ), Ultrasons, thermographie infrarouge, analyse vibratoire...

Le principe de la détection d'un défaut quelque soit la méthode consiste à exciter le matériau à analyser et recueillir la réponse. On distingue les étapes suivantes : excitation par la mise en œuvre d'un processus physique, perturbation par modulation ou altération de ce processus par les défauts et révélation par détection de ces modifications par un capteur approprié, traitement des signaux et interprétation de l'information recueillie. Cependant, quelle que soit la méthode employée, un processus de détection des défauts est généralement mis en place. est constitué de deux étapes principales la détection et la localisation des défauts (décider que le système est en défaut ou non et déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification (estimer l'ampleur et le type des défauts). Les défauts de corrosion sont caractérisés par l'apparition d'une modification de surface par un écaillage ou un effritement par suite des réactions de transformation pour la production de la corrosion.

Les applications des détection CND sont nombreuses : la détection de l'endommagement d'un élément de centrale nucléaire, la disposition de tuyaux enterrés, la localisation de masses métalliques dans des structures en béton...

1.3.1 Détection par flux magnétique

Les procédés magnétiques de contrôles non destructifs permettent la détection des défauts superficiels débouchant ou non débouchant dans les matériaux ferromagnétiques. L'examen consiste à soumettre le matériau à analyser à un champ magnétique de valeur définie en fonction des caractéristiques du matériau. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques qui sont mise en évidence. L'image magnétique obtenue est analysée. De puissants aimants sont utilisés dans cette technique induisant un flux magnétique dans la paroi de la conduite.

Des capteurs placés entre les pôles détectent tout changement d'intensité résultant d'une perte de métal ou d'un changement d'épaisseur. La puissance du flux magnétique requise est relativement élevée.

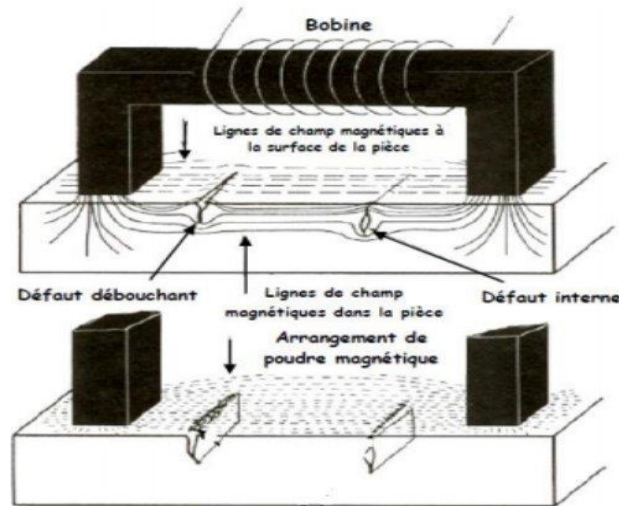


Figure 9 Principe de la détection magnétique

1.3.2 Détection par rayonnement

La radiographie est une méthode de contrôle non destructif qui consiste à obtenir une image de la densité de matière d'un objet traversé par un rayonnement électromagnétique X ou gamma. Ces techniques d'examen reposent sur la propriété qu'ont les rayonnements électromagnétiques de très faibles longueurs d'ondes λ , ce qui leur permet de traverser la matière. Le principe de la formation des images de défauts en radiologie repose sur l'absorption différentielle de ces rayonnements dans le matériau contrôlé.

Les rayons X, sont des ondes électromagnétiques, de longueur d'onde très courte, comprise entre 10^{-7} et 10^{-11} mètres, et dotées d'une grande énergie. L'analyse et la détection de défauts dans la matière sont effectuées en utilisant les rayons X en traversant la matière, tandis qu'un rayonnement de plus grande longueur d'onde est réfléchi par la surface du matériau analysé.

Le principe de la radiographie enregistre l'image formée par des rayons X qui sont plus ou moins absorbés lorsqu'ils traversent la matière. On obtient ainsi à la fois une représentation de la constitution interne (structure, armatures, assemblages, ...). Lors de la traversée de la matière par les rayons, les éventuels défauts contenus dans celle-ci constituent des obstacles qui absorbent plus ou moins le rayonnement. Les différences d'absorption peuvent être soit visualisées sur un écran fluorescent soit enregistrées sur un film spécial. La réalisation des clichés et l'interprétation des images nécessite un personnel qualifié et nécessite des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement.

Les rayons X sont couramment employés pour surveiller les soudures dans les centrales nucléaires, les chantiers navals et pétroliers, la corrosion des tuyaux ou les fissures dans les pièces mécaniques complexes.

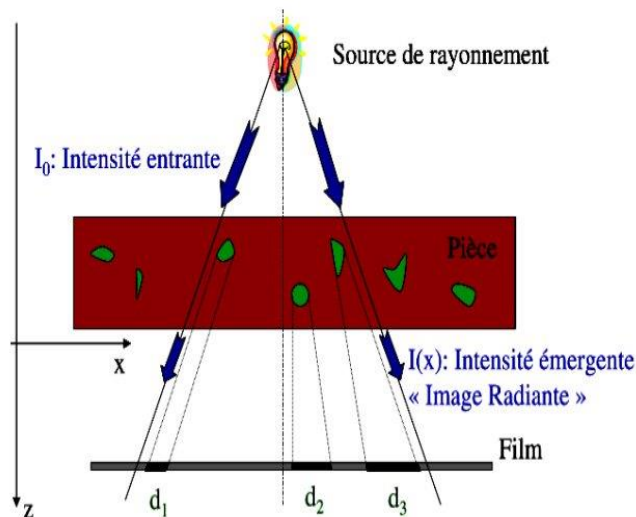


Figure 10 Principe de la detection par rayonnement x

1.3.3 Détection par Ultrasons

La détection par *ultrasons* a été étudiée dans de nombreux systèmes et structures en utilisant diverses techniques ultrasoniques [11-13] pour analyser les défauts de joints soudés, les défauts de corrosion, la détermination des propriétés mécaniques des matériaux en fonction de leur relation avec les caractéristiques métallurgiques ou le développement de capteurs à ultrasons pour une détection précoce des fuites de fluide. Ce sont des ondes mécaniques qui se propagent dans les milieux élastiques. Lorsque ces ondes rencontrent une interface entre deux milieux de nature différente de celle du milieu de propagation, il y a réflexion de tout ou partie de l'onde incidente. L'énergie réfléchie est captée en surface par l'élément (transducteur) qui lui a donné naissance. Cette énergie mécanique transformée en signal électrique, engendre sur un oscilloscope, une déflexion de la trace horizontale. La position de la déflexion de la trace va permettre de localiser l'interface réfléchissante. Le transducteur ultrasonique utilise l'effet piézoélectrique pour convertir l'électricité en vibration mécanique et former des ondes ultrasoniques.

La surveillance par ultrasons repose sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore qui se propage dans la pièce à surveiller. Les défauts sont réfléchis par le train d'onde émis qui revient vers le transducteur (qui est souvent à la fois émetteur et récepteur). En analysant les signaux, il est possible de localiser le défaut et de déterminer ses dimensions relatives. La méthode offre une grande résolution spatiale et permet de détecter des défauts à la fois dans le volume de la matière et en surface.

Les principes essentiels du contrôle non destructif par ultrasons reposent sur l'étude de l'impact des défauts, des différences de structure et des phénomènes de réflexion, de réfraction et de transmission sur les interfaces, ainsi que sur l'atténuation dans la matrice liée aux phénomènes.

La vitesse de l'onde varie en fonction de la composition des matériaux et du type d'onde :

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (5)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (6)$$

$$V_S = 0.9 V_T \quad (7)$$

Où

V_L Vitesse d'onde longitudinale

V_T Vitesse d'onde transversale

V_S Vitesse d'onde de surface

E Module d'Young du matériau

ρ masse spécifique du matériau (Kg/ m³)

μ coefficient de poisson

1.4 Application des ultrasons à la détection des défauts de surface dans les aciers de pipelines API 5L X60

Des défauts apparaissent invariablement sur les surfaces externes des aciers de pipelines tels que les défauts de soudure, les défauts de corrosion ou les défauts de fissuration, même lorsque les procédures les plus strictes sont suivies. Des critères d'acceptation doivent être établis pour déterminer les défauts qui doivent être éliminés et ceux qui peuvent rester. Cette distinction est devenue encore plus importante avec l'emploi des aciers à haute résistance.

L'une des méthodes de détection est l'emploi d'une onde sonore (onde acoustique) ou son qui est une onde mécanique qui nécessite un milieu matériel élastique et déformable pour se propager. L'onde sonore consiste en une propagation de proche en proche d'une déformation qui provoque localement des variations de pression et des oscillations des molécules autour de leur position d'équilibre, l'onde sonore est longitudinale.

Les ondes sonores sont émises par une source (voix humaine, diapason) et mises en évidence par un récepteur. Elles sont caractérisées par leur fréquence. Ces ondes acoustiques transitoires se propagent dans la structure à une vitesse qui dépend du type de matériau et du mode vibratoire (ondes de volume, de surface ou de plaque). Ces ondes, d'émissions acoustiques, sont détectées à l'aide de transducteurs attachés à la surface de la structure. Ces signaux sont généralement faibles. Elles se répartissent en 3 bandes caractérisées par leur fréquence : Les sons audibles par l'oreille humaine sont compris entre 20 Hz et 20 000 Hz. Les sons de basse fréquence ou infrasons sont les sons graves, les sons aigus. Les ultrasons ont des fréquences supérieures à 20 000 Hz.

L'émission acoustique est une méthode non destructive de détection qui ne dépend pas des ondes sonores envoyées à travers le matériau, contrairement à la détection par ondes ultrasons. Les matériaux génèrent des bruits audibles lorsqu'ils sont soumis à une charge adéquate.

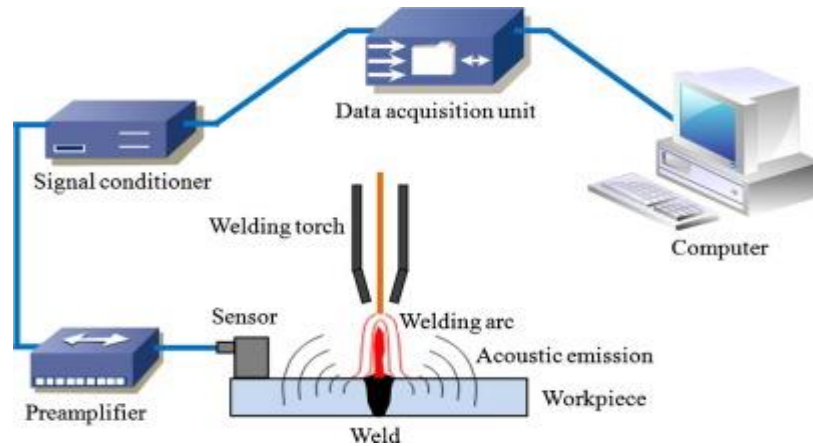


Figure 11 Principe de la détection par émission acoustique

1.4.1 Détection de défauts par Ultrasons TOFD

La technique de détection de défauts par ultrasons TOFD « diffraction en temps de vol » [14] est une technique non destructive ultrasonore de détection, de dimensionnement et de caractérisation des anomalies dans un matériau. Elle est basée sur l'analyse du temps de vol des signaux de diffraction, qui se produisent lorsqu'un faisceau ultrasonore rencontre un obstacle et réémet des ondes omnidirectionnelles en utilisant la diffraction du faisceau d'ultrasons causé par la présence d'une discontinuité dans le trajet des ultrasons. Ce qui permet de localiser les défauts de surface et de déterminer leur taille.

La méthode nécessite une préparation de surface et l'utilisation d'un milieu de couplage (huile, gel, etc.) pour garantir une transmission du faisceau ultrasonore et faciliter le balayage du transducteur. Cette technique est une méthode très sensible pour détecter les hétérogénéités du matériau et fournit une appréciation quantitative de la véritable hauteur des défauts évidents, comme dans les aciers au carbone.

Le principe du contrôle à l'examen ultrasonore TOFD (figure 12) utilise la diffraction ultrasonore comme méthode de détection de défauts. Elle consiste à mettre en évidence et à exploiter les signaux diffractés par des discontinuités dans le matériau contrôlée. Lorsque l'onde ultrasonore rencontre une discontinuité (défaut de soudure, de corrosion ou fissures), une partie de l'énergie incidente est réfléchiée tandis qu'une autre partie de l'énergie, beaucoup plus faible, est diffractée par les bords de la discontinuité. C'est cette partie diffractée qui est exploitée dans la technique TOFD. Généralement, un contrôle TOFD est effectué avec deux transducteurs piézo-électriques à ondes de compression et à faisceau de grande ouverture émetteur et récepteur placés symétriquement par rapport au composant. Les deux capteurs,

solidaires par un mécanisme qui maintient une distance et un alignement constant entre eux, sont déplacés parallèlement à l'axe du composant permettant l'enregistrement des données.

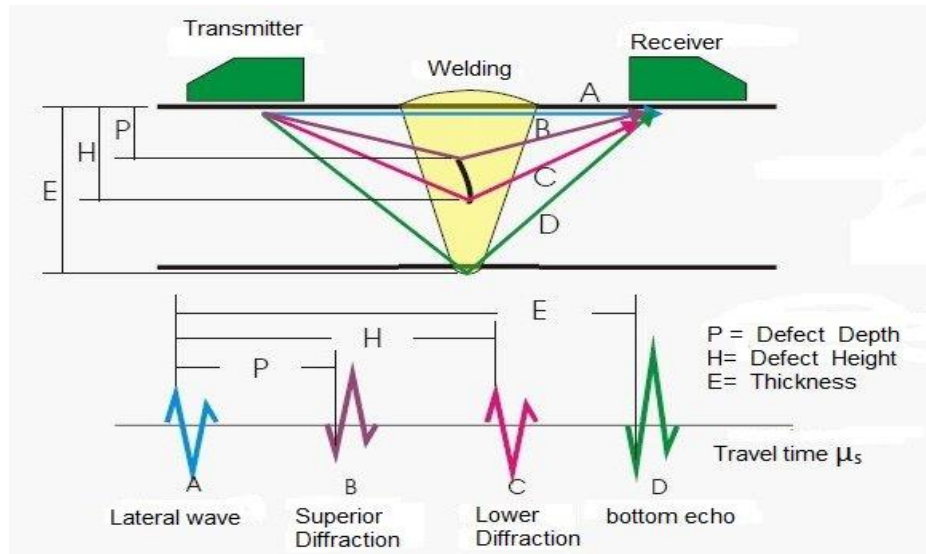


Figure 12 Principe de la détection des défauts par ultrasons TOFD

1.4.2 Détection de défauts par Ultrasons C-Scan

La technique de détection de défauts par ultrasons C-Scan [15] est une technique non destructive ultrasonore de détection à haute fréquence permettant d'identifier les défauts et leur la profondeur. L'énergie acoustique est transférée au composant, en le plongeant complètement dans un réservoir d'eau avec les transducteurs afin de localiser les défauts et de déterminer leur taille (figure 13). Pour générer une image, C-scan utilise une projection des données ultrasoniques sur une vue en plan du composant testé. En général, cette méthode de cartographie est employée pour détecter la corrosion et d'autres imperfections. Le C-scan ultrasonique à haute fréquence est une technique permettant d'examiner la profondeur des défauts à l'intérieur du matériau. La propagation des ondes ultrasonores utilise une immersion en réservoir standard. Un signal très haut fréquence jusqu'à 50 MHz est transmis à l'échantillon par un transducteur focalisé. L'échantillon et le transducteur sont immergés dans l'eau qui sert de milieu de couplage. Le signal initial est partiellement réfléchi vers le transducteur au niveau des interfaces, des défauts, des porosités et en cas de fortes différences d'impédance acoustique dans l'échantillon et le reste du signal, s'il n'est pas entièrement réfléchi, continue à travers l'échantillon. La détection par C-scan est très rapide, précise et reproductible. La détection est effectuée en temps réel même si une analyse plus approfondie serait nécessaire pour caractériser les défauts.

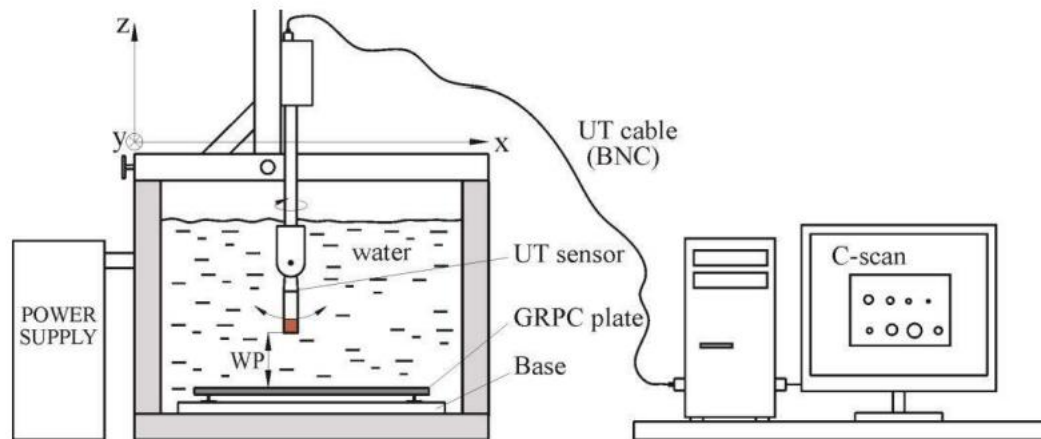


Figure 13 Principe de la détection des défauts par ultrasons C-Scan (Couplant à eau) [14]

1.5 Synthèse bibliographique

Après plus de trente ans de service, la ligne de pipeline GZ1 "40" de transport du gaz naturel exploité par la société SONATRACH présente des imperfections externes sur la surface de l'acier API 5L X60, telles que des piqûres de corrosion, des fissures, des défauts de soudure...

La surveillance des défauts de la ligne GZ1 40 » réalisée par outil ultrasonique intelligent de type "Magne Scan HR"[16] a révélé que les défauts de corrosion représentaient plus de 93,6 % de tous les défauts identifiés. Les points à considérer dans une première étape de l'étude sont de mieux comprendre les mécanismes de corrosion de l'acier par le sol et l'influence de paramètres physiques tels que la température, le pH, la durée d'immersion ainsi que l'influence des contraintes mécaniques. Une deuxième étape consiste à identifier les techniques appropriées pour détecter et caractériser les défauts de surface.

Selon la littérature plusieurs études développées ont montré que la corrosion de l'acier par les sols dépend de divers facteurs physico-chimiques tels que la nature du sol, sa résistivité et la composition chimique de l'acier. Cela concerne non seulement la détérioration de l'acier, mais également les joints soudés. C'est la conséquence de l'interaction électrochimique entre l'acier et le sol pour revenir à la forme oxydée plus thermodynamiquement stable. Ce sont des phénomènes préoccupants dans l'industrie pétrolière et les laboratoires de recherche. Le profil de corrosion est la conséquence de la défaillance de revêtements ne disposant pas d'une protection cathodique adéquate. Les conséquences de la corrosion se traduisent par des pertes d'épaisseur à différentes profondeurs, pouvant entraîner des perforations et des fuites de gaz.

La détection et la caractérisation des défauts de surface par leurs localisation, dimensionnement et type a été l'étape suivante où différentes recherches ont montrés que les imperfections de surface de l'acier ont pu être repérées et mesurées en utilisant des techniques non destructives telles que les méthodes ultrasoniques, qui fournissent des informations très précises en temps réel sur la position et la taille du défaut détecté [17]

Akkouche et all [18] ont étudiés la corrosion de l'acier au carbone S235JR pour pipelines dans une solution de sol artificiel, en prenant en considération divers facteurs tels que la quantité d'eau, l'aération ou le niveau d'oxygène, la résistivité du sol et la surface active. Les

phénomènes observés lors des périodes d'assèchement et d'humidification de différents types de sols ont été étudiés : argileux, limoneux argileux et sableux. Les conclusions obtenues après avoir été caractérisées à l'aide de techniques électrochimiques et de surface ont démontré que lorsque l'humidité est élevée et que la ventilation est mauvaise, les taux de corrosion sont très faibles mais deviennent importants lors des étapes de séchage, en prenant en considération divers facteurs tels que la quantité d'eau, l'aération ou le niveau d'oxygène, la résistivité du sol et la surface active. Les phénomènes observés lors des périodes d'assèchement et d'humidification de différents types de sols ont été étudiés : argileux, limoneux argileux et sableux. Les conclusions obtenues après avoir été caractérisées à l'aide de techniques électrochimiques et de surface ont démontré que lorsque l'humidité est élevée et que la ventilation est mauvaise, les taux de corrosion sont très faibles mais deviennent importants lors des étapes de séchage.

A Benmoussat and M. Hadjel [19], en prenant en compte certains paramètres des sols à faible résistivité, ont analysés le comportement de corrosion de l'acier de pipeline à faible teneur en carbone dans les sols comme la montmorillonite, qui présente des propriétés corrosives, la teneur en humidité et la température du sol, facilitant l'échange ionique entre la surface de l'acier et l'environnement corrosif du sol. Les défauts de surface de l'acier résultant des interactions de corrosion sont principalement liés à la composition du sol dans lequel le pipeline est enfoui. Le phénomène est accentué par la diminution du pH et l'augmentation de la température.

Le comportement à la corrosion des aciers à faible teneur en carbone non revêtus tels que l'acier X65 [20] a été étudié après enfouissement dans la plupart des sols calcaires réels. Les échantillons n'ont pas été protégés cathodiquement lors des essais gravimétriques sur le terrain. Les résultats ont montré une rugosité importante et un changement de couleur de la surface dû à la présence de dépôts de rouille et de calcaire. L'acier X65 était le plus sensible à la corrosion, comme l'ont testé des méthodes électrochimiques sur un sol calcaire réel montrant une corrosion accrue.

Arriba-Rodriguez and all [21] ont donné une méthode pour évaluer la corrosion dans les structures en acier enterrées en estimant leur durée de vie sur la base de méthodes quantitatives non électrochimiques pour estimer le taux de corrosion par méthode de perte de poids. La technique consiste à placer une éprouvette métallique ou une structure dans différents milieux souterrains pendant une durée déterminée en considérant leurs caractéristiques de résistivité et la composition du sol. Pour une résistivité $< 500 \Omega \cdot \text{cm}$, le sol est très corrosif. De plus, il a été démontré que la gravité de la corrosion résulte de la combinaison d'un grand nombre de facteurs.

Des méthodes de modélisation probabilistes et statistiques ont été utilisées pour évaluer l'intégrité des pipelines corrodés [22] en se basant sur trois aspects principaux : la profondeur des défauts et les taux de corrosion, les applications bayésiennes dans l'intégrité des pipelines pour mettre à jour la distribution de probabilité des défauts de corrosion : profondeur, longueur et dimension spatiale, distribution et fiabilité du pipeline. Les modèles stochastiques et les distributions ajustées à partir des données observées peuvent être utilisés pour estimer la

fiabilité des oléoducs et des gazoducs. L'approche de simulation de Monte Carlo a été utilisée pour prévoir la distribution à long terme du taux de corrosion par piqûres et pour estimer la fiabilité du pipeline. Grâce à l'analyse bayésienne des données, il est possible d'évaluer les distributions de probabilité de la profondeur, de la longueur et de la densité des défauts de corrosion.

Akhlaghi, and All [23] ont explorés le potentiel des modèles d'apprentissage profond pour prédire la profondeur maximale de la corrosion par piqûres dans les pipelines de pétrole et de gaz. Les modèles ont été formés en tenant compte de diverses caractéristiques du sol, de l'endroit où le tuyau est enterré, et de différents types de revêtements protecteurs des tuyaux. Les résultats démontrent que les modèles d'apprentissage profond surpassent tous les modèles empiriques et hybrides appliqués dans des études précédentes sur le même ensemble de données. Le modèle proposé dans l'étude a le potentiel de prédire les taux de défaillance des pipelines dus à la corrosion externe et d'améliorer la sécurité et la fiabilité de ces installations. Différents capteurs et méthodes de surveillance ont été développés pour détecter la corrosion, en utilisant différentes techniques non destructives [24]. Selon la discussion des auteurs, la méthode acoustique est meilleure en termes de surveillance de la croissance de la corrosion, de localisation, de détection de micro-changements et de profondeur de corrosion sur une plage de 2 m à 120 m. Les données contenant des informations de fréquence allant de 0,1 à 1 MHz sont traitées à l'aide d'une transformée de Fourier pour diviser le signal acoustique en informations de fréquence. On utilise des modèles de prédiction de la corrosion ainsi qu'une évaluation de la fiabilité des pipelines en acier au carbone afin de prédire la durée de vie des structures. Les perspectives d'avenir se concentrent sur la création de divers systèmes de détection, de catégorisation, de prévision de la fiabilité et de prévention de la corrosion.

La détection et la surveillance de la corrosion du taux de corrosion et de la perte de métal ont été réalisées en mesurant le changement de résistance électrique de l'acier exposé à l'environnement corrosif du sol à l'aide d'une sonde à résistance électrique [25]. L'instrument collecte des données périodiques sur les sites en mesurant les effets des composants électrochimiques et mécaniques de la corrosion tels que les cavitations. L'instrument produit un signal linéarisé proportionnel à la perte de métal de l'élément exposé, qui est fonction de l'épaisseur et de la géométrie de l'élément à analyser. La corrosion entraîne une diminution (perte de métal) de la section transversale de l'élément, ce qui entraîne une augmentation proportionnelle de la résistance électrique de l'élément.

Les matériaux comportant des défauts tels que les fissures ont été caractérisés en estimant leur taille, leur dimension et leur emplacement à l'aide de la méthode ultrasonique TOFD [26]. La technique de contrôle par ultrasons repose sur la détermination du temps de vol des échos diffractés des bords du défaut (temps de diffraction TOFD). Pour améliorer le temps d'arrivée d'un signal TOFD, une technique d'estimation basée sur l'optimisation par essaim de particules (PSO) et la décomposition de poursuite correspondante (MP) est proposée. La technique TOFD a été modélisée dans une géométrie bidimensionnelle à l'aide d'un progiciel. Les résultats de simulation et expérimentaux ont prouvé l'efficacité de la méthode proposée.

La détection par ultrasons de matériaux métalliques à l'aide d'échantillons comprenant certains défauts créés artificiellement a été exposée à des ondes ultrasonores pour établir une apparence hypothétique de défauts naturels [27]. L'objectif principal est la détection de défauts dans des échantillons métalliques en comparant les résultats simulés et expérimentaux. Il s'est avéré qu'il existait une bonne corrélation entre les deux méthodes, permettant d'utiliser la simulation ultrasonore comme méthode de détection. L'objectif principal des contrôles non destructifs par ultrasons est la détection des défauts des matériaux métalliques en fonction de leurs données primaires, c'est-à-dire la taille, la forme et la position. Le signal réfléchi dans le matériau est comparé aux signaux obtenus au niveau d'un défaut spécifique avec ceux du matériau sans défaut. De cette manière, il est possible de déterminer l'existence ou l'absence d'hétérogénéités attribuables à un défaut spécifique.

D'autres applications des ultrasons s'inscrivent dans le cadre de l'inspection onshore ou offshore, comme l'intégrité des pipelines de transport d'hydrocarbures à l'aide de l'outil intelligent à ultrasons ou du racleur à ultrasons. Ce procédé de robotique industrielle intelligente utilise des outils automatiques et autonomes pour l'acquisition et le traitement des données, offrant ainsi un niveau de détection élevé. L'appareil contient plusieurs sondes à ultrasons réparties uniformément pour vérifier l'épaisseur de toute la circonférence du tube. La surveillance des défauts de surface externes de la ligne GZ1 40" a été réalisée par un outil ultrasonique intelligent de type "MagneScan HR" [28]. Les défauts de corrosion représentaient plus de 93,6 % de tous les défauts identifiés.

1.6 Conclusion

Les aciers de pipeline API 5L X60 de la ligne GZ1 après exploitation plus de trente ans de service, présente actuellement un état dégradé comme les défauts externes de surface (piqûres de corrosion, fissures, défauts de joints de soudure, etc. Particulièrement par corrosion à un taux important atteignant plus de 90%. Ce qui a provoqué des pertes importantes de métal dans différents sites. Même lorsque le système de protection est appliqué, les aciers sont très vulnérables à la corrosion par les sols, ce qui entraîne la propagation de défauts en surface externe.

Étant donné la relation entre les conditions de service et les défaillances et la variation des défauts, de nombreuses études ont examiné l'évaluation des défauts afin de déterminer leur présence, leur identification, leur taille et leur localisation

Le contrôle non destructif (CND) permet de détecter les défauts en étudiant l'état d'un système, d'une structure ou d'un matériau sans le détériorer afin de réaliser un diagnostic. Un moyen de détection consiste à utiliser une onde sonore (onde acoustique) ainsi que des ondes ultrasons.

La méthode de détection de défauts par ultrasons TOFD, également appelée diffraction en temps de vol, est une méthode non destructive utilisée pour détecter, mesurer et caractériser les anomalies présentes dans un matériau. Elle repose sur l'étude de la durée de vol des signaux d'infractionnels. On l'emploie afin de repérer les imperfections dans les aciers.

Le C-Scan est une méthode de détection de défauts par ultrasons non destructive qui utilise une fréquence élevée pour détecter les défauts et leur profondeur.

Il a été montré à travers la synthèse bibliographique que les aciers utilisés dans les pipelines sont susceptibles de se corroder par les sols, influencé par la nature du sol, en particulier les sols à faible résistivité. Plusieurs auteurs ont développé les techniques de détection des défauts par ultrasons.

Dans le prochain chapitre, nous exposerons le contexte industriel de la ligne GZ1 ainsi que les difficultés rencontrées lors du transport des hydrocarbures par canalisation, ainsi que les divers résultats des rapports d'expertise de la ligne.

CHAPITRE II
CONTEXTE INDUSTRIEL

II. Introduction

Les produits d'hydrocarbures sont acheminés par canalisation sous forme de réseaux de pipelines ont été construits et se développent toujours. En Algérie, la société algérienne SONATRACH gère un réseau de canalisations pour le transport des hydrocarbures (Pétrole Brut, Condensat, Gaz Naturel et Gaz Pétrole Liquéfié) qui comprend 22 systèmes de transport par canalisation (STC) d'une longueur totale de 20 705 km [29]. Un STC est composé d'une ou plusieurs canalisations transportant des hydrocarbures, incluant les installations intégrées et les capacités de stockage associées à ces ouvrages, telles que 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 télécontrôle. La longueur du réseau de transport par canalisation est répartie selon les produits où le gaz naturel est majoritaire et représente presque la moitié du total transporté (figure 14). Il existe 14 lignes de gazoducs d'une longueur totale de 8629 km dans le réseau de gazoducs. Notre étude porte sur le gazoduc GZ1 40 pouces qui relie le gisement de Hassi R'mel à la raffinerie d'Arzew, sur une distance de 507 km. La ligne a commencé à fonctionner en 1976.

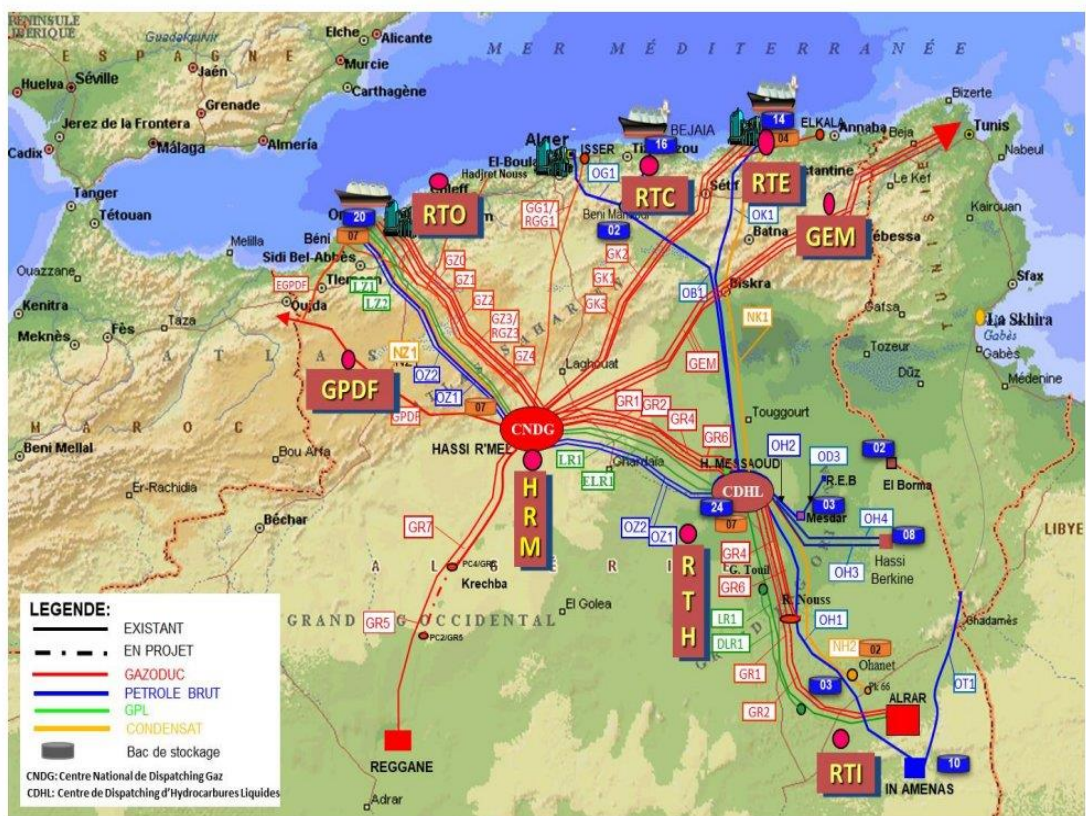


Figure 14 Cartographie du Réseau de Transport exploitée par SONATRACH (2021)[29]

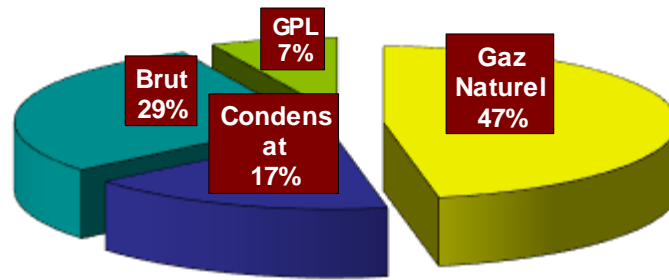


Figure 15 : Longueur du réseau de transport par canalisation réparti en fonction des produits transportés, où le gaz naturel représente près de la moitié.

II. 1 Expertise de la ligne GZ1

La ligne GZ140 est une section du réseau de pipelines appelé route multiple qui transporte du gaz naturel de Hassi R'mel jusqu'à la zone industrielle d'Arzew sur une distance de 507 km. Elle a été construite et mise en service en 1976. Il s'agit d'une ligne en sol dont la profondeur varie de 0,6 à 1 mètre. Elle est composée de tubes en acier API 5L X60 soudés et roulés. Un revêtement épais bitumineux est appliqué sur le chantier pour protéger les tubes des agressions extérieures telles que la corrosion et les courants vagabonds. Ce revêtement est renforcé par un système de protection cathodique (PC) avec un potentiel minimum de -850 mV Cu/CuSO₄ afin d'isoler l'acier de l'environnement du sol et d'éviter tout risque de dégradation par corrosion ou fissuration. La ligne dispose de cinq stations de compression du gaz afin de maintenir la pression tout le long du tracé de la ligne.

Tableau 3 Les paramètres d'écoulement du gaz naturel à la sortie des stations de compression

Ligne	Température Max [°c]	Température Min. [°c]	Pression Max. [bars]	Pression Min. [bars]	Débit [m ³ /an]
GZ1	81	40	69.8	42	15.33 x 10 ⁶

Lors des opérations de maintenance effectuées sur les tubes défectueux à la station STT (Station de Traitement des Tubes) que DRC/SONATRACH (Direction de Réparation des Canalisations) à Bethioua (Oran) exploite depuis plusieurs années, de nombreuses défaillances ont été identifiées, notamment des pics de corrosion localisés ou uniformes, des fissures, ainsi que des décollements des revêtements et leur détérioration. Ces problèmes ont surgi au fil du temps et ont été davantage présents sur la paroi externe des tubes en acier. Leur tendance à fusionner a engendré un défaut adéquat pour entraîner la perforation des tubes.

D'après le rapport d'expertise STT [30], ces pannes ont eu lieu dans les sols agressifs contenant des eaux souterraines salines (*Macta* Mostaganem) et dans les sols argileux de type montmorillonite (*Medarreg*, Tiaret).

La majorité des pannes sont provoquées sur le matériau en raison de mécanismes de corrosion localisée ou de fissures tels que la corrosion sous contraintes. Cependant, il existe également d'autres problèmes liés aux défauts de soudage ou aux mouvements de terrain tels que le glissement du sol ou les tremblements de terre, qui peuvent affecter les pipelines enterrés.

D'après le rapport d'expertise de la société "groupe limited Canada" -PII en 2004, sur le tronçon reliant la station de compression SC2 Oued M'Seka (W. Laghouat) à SC3 Medarreg (W. Tiaret) en utilisant l'outil intelligent ultrasonique de type Magne Scan HR, les défauts de corrosion externes représentent 93,6% de tous les défauts identifiés, tandis que les défauts internes ou les défauts de fabrication représentent un pourcentage plus faible.

D'après le rapport d'expertise de la "Société Weather ford" en 2009 sur le tronçon reliant la station de compression SC3Medareg (W. Tiaret) à SC4Nador (W. Tiaret) a été examinée utilisant le contrôle par piston instrumenté à fuite de flux magnétique. Il a été constaté que les défauts liés à la perte de métal sont principalement à l'intérieur et représentent 82% des défauts identifiés, jusqu'à une profondeur de 40,5%. En revanche, les défauts liés à la perte de métal sont à l'extérieur, représentant 46,2%. Chaque perte de métal est causée par la corrosion. On a repéré des défauts de soudure avec un taux inférieur.



Figure 16 : Exemples de défauts de surface externes sur la ligne GZ1 40''

II. 2 Conclusion

La société SONATRACH exploite un réseau de canalisations de transport d'hydrocarbures (Pétrole Brut, Condensat, Gaz Naturel et Gaz Pétrole Liquéfié) qui s'étend sur une distance de 20 705 km. Il est en pleine expansion par un accroissement des longueurs de canalisations, et par une augmentation de leur diamètre en raison de leur avantage dans le transport. Cependant des questions sont posées à la sécurité du transport et à l'environnement. Les tests de la ligne réalisés à l'aide d'un outil intelligent à l'ultrason ou d'un piston instrumenté à fuite de flux magnétique ont montré leur efficacité. Les défauts de surface d'origine externes dû à la corrosion atteignent 93,6% de la totalité des défauts identifiés par rapport aux autres défauts comme les défauts externes ou les défauts de fabrication ou le pourcentage est minime. Ces défauts résultent de l'interaction de l'acier nu avec les sols suite à la défaillance du système de protection qu'il faudra revoir et tenir compte des avancées technologiques en matière de détection des défauts par les techniques de contrôle non destructives.

Dans le domaine industriel, la méthode ultrasonique peut être employée en tant que technique de robotique industrielle intelligente, où les outils d'acquisition et de traitement des données sont automatiques et autonomes, offrant ainsi un niveau de détection élevé. Il est possible d'adopter la stratégie de maintenance comme une mesure préventive en planifiant des inspections en ligne régulières pour repérer la nature, l'emplacement et la taille des défauts.

Les futures études devraient viser à mieux comprendre les phénomènes de corrosion pour développer des méthodes avancées de tests non destructifs et de protection contre la corrosion à partir de sources naturelles, des méthodes économiques et pratiques utilisant de nouvelles formulations écologiques, biodégradables et non toxiques selon le concept de développement durable.

Dans le chapitre suivant, nous exposerons les diverses études expérimentales, en commençant par évaluer la corrosion de l'acier API 5L X60 en sol en simulant le contexte industriel et la variation des paramètres influant et dans une seconde étape la détection des défauts de surface par piqure de corrosion et des défauts de joints de soudure en utilisant les techniques ultrasoniques TOFD et C-Scan

CHAPITRE III
MATERIELS ET METHODES

III. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les techniques électrochimiques utilisées pour étudier la corrosion en laboratoire. Nous prendrons en considération l'effet de la composition du sol, des contraintes mécaniques, du pH et de la température. Nous simulerons le contexte industriel en présentant l'acier de pipeline API5L X60 en fonction de sa composition chimique, de sa microstructure et de ses caractéristiques mécaniques. Il est important de noter que les conditions de terrain ne peuvent pas être parfaitement reproduites.

Nous présenterons dans un second temps les tests d'analyse des défauts de surface par émission ultrasonique C-scan et par méthode ultrason TOFD.

Lors des opérations de maintenance de la station STT (station de traitement des tubes) exploitée par DRC Sonatrach, des échantillons d'acier ont été prélevés de la ligne des tubes corrodés. À l'aide d'un outil intelligent, les tubes ont été examinés par ultrasons afin de détecter certains défauts de surface, tels que des défauts de corrosion et des défauts de soudure. Le choix de la méthode de découpe a été fait pour préserver la microstructure et les caractéristiques de l'acier, sans causer de dommages thermiques et mécaniques, en raison de sa faible contribution thermique et des dommages mécaniques en évitant les zones thermiquement affectées. Les échantillons ont été usinés selon les dimensions requises. L'électrode de travail pour les mesures électrochimiques est de (1,8 × 1,0 cm). Les échantillons pour les essais de traction sont de taille standardisée. Les échantillons pour les essais acoustiques sont de 3 × (10 × 20 cm), dont l'un comprend une soudure de type V qui comprendra certains défauts créés en surface tels que des piqûres de corrosion et des défauts de soudure. Les échantillons ont été soumis à des tests d'émission ultrasonique C-scan et à des tests ultrasoniques TOFD, et l'immersion et la non-immersion identifient les défauts de surface après dégraissage à l'acétone et polissage mécanique.

III.1 Caractérisation de l'acier

III.1.1 Analyse chimique de l'acier

L'analyse spectrophotométrique de la composition chimique de l'acier a été réalisée à l'aide d'un appareil de type « spectro Rp 212 », les résultats sont présentés dans le Tableau 4. On a comparé les valeurs mesurées aux valeurs standard API [31]. Les résultats confirment l'existence d'un acier micro allié au manganèse à faible carbone. La présence d'un faible taux de carbone garantit une soudabilité optimale et une résistance mécanique optimale. Le manganèse et le vanadium étaient bénéfiques pour le durcissement.

Tableau 4 Composition chimique (%) de l'acier API 5L X60 réalisée par analyse spectrophotométrique.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.018	0.036	1.400	0.017	0.013	0.028	0
Ni	Al	Cu	Ti	V	Sn	Fe
0.018	0.049	0.032	0.005	0.0061	0.0031	≈97.880

III.1.2 Microstructure

Les surfaces d'acier API 5L X60 ont été analysées à l'aide d'un microscope optique et d'un microscope électronique à balayage (MEB), avec le modèle HITACHI TM-1000 (HITACHI, Tōkyō, Japon). Les échantillons ont été préalablement préparés par polissage et attaque chimique par une solution de Nital 2%. Une microstructure fine de type ferrito-perlitique a été observée lors des examens métallographiques (Figure 17), avec une prédominance de ferrite et des amas de perlite aux joints de grains. Il y a eu quelques inclusions, qui suggèrent la présence probable de sulfures de manganèse. L'acier est du type à limite d'élasticité élevée (HLE) à bas carbone micro allié au manganèse.

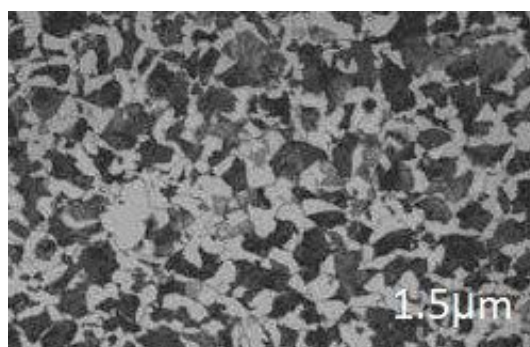


Figure 17 : Microstructure de l'acier pour pipeline API 5L X60 après attaque dans une solution à 2 % de Nital

III.1.3 Caractéristiques mécaniques

Le tableau 5 présente les caractéristiques mécaniques de l'acier API5L X60 conformément à la norme API standard.

Tableau 5 Caractéristiques mécaniques de l'acier API5LX60 selon la norme API Standard (Re : Limite d'élasticité, Rm : Résistance à la rupture, A : Allongement à la rupture).

Valeurs standard					
X60 Steel	Re [MPa]		Rm [MPa]		A [%]
	Min.	Max.	Min.	Max.	
	414	565	517	758	17.5-24

On a effectué l'essai de traction avec et sans l'utilisation de la solution artificielle de sol simulée en utilisant des éprouvettes plates normalisées conformément à la norme française (NF EN 100002-1 d'épaisseur 9 mm) prélevées sur un tube et préalablement usiné conformément à la norme API 1104. On a effectué les tests sur une machine universelle de type CONTROLAB 30 qui peut supporter une force maximale de 600 KN. Il y a des capteurs de force et d'allongement sur le banc d'essai. Les courbes de traction à faibles vitesses sont suivies par le logiciel « Universal Testing Machine »

(<https://universalmotion.com/UniversalTestingSoftware.html>) qui permet d'obtenir des données sur la résistance, la rigidité et la ductilité du matériau analysé.

Le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, l'élasticité limite, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction ont été mesurés à température ambiante (+25°C) avec et sans l'influence de la solution artificielle de sol simulée, ce qui a permis de déterminer les principales caractéristiques mécaniques.

Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes usinées ayant subi avant chaque essai un polissage mécanique et un nettoyage à l'acétone et séchées à l'air ensuite sans immersion et immersion dans la solution de sol artificiel simulé préalablement définie pour un temps d'immersion de 7 à 90 jours. Les résultats sont rapportés dans le tableau 6.

Tableau 6 Caractéristiques mécaniques des éprouvettes plates en acier normalisé API 5L X60 après immersion sans immersion et immersion dans la solution de sol artificiel simulé obtenue par essais de traction à température ambiante. (Z- Striction)

Numéro de Test	Temps d'Immersion		Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Z (%)
	(Jours)	(h)				
1	-	-	570	664.222	20.0	23.905
2	7	168	500	623,916	20.0	55,517
3	28	672	480	599,939	18,4	57,361
4	60	1440	490	614,733	20.0	54,508
5	90	2160	510	652,995	20.0	59,722

III.2 Solution de sol

Afin de déterminer la composition de la solution de sol simulée pour analyse, plusieurs échantillons de sol ont été prélevés à différents endroits précis de la ligne où des défauts de corrosion sont apparus et ont été analysés par microanalyse spectrophotométrique.

L'analyse du sol a été réalisée conformément à la norme AFNOR A-05.250 P.278. On prélève une quantité de sol, puis on la mélange à de l'eau distillée et on l'analyse en suivant les procédures d'échantillonnage pour éliminer toute contamination ou modification de la composition pouvant être causée par divers facteurs tels que la température ou une mauvaise manipulation. La composition chimique des sols est donnée dans le tableau 12 pour les différents sites Si considérés [32]. Nous avons choisi la composition la plus agressive pour analyse. Le critère d'agressivité choisi est principalement la teneur en éléments favorisant l'interaction de l'acier avec le sol tels que les ions chlorure, sulfate et bicarbonate [18]. La solution d'essai artificielle pour l'analyse de la corrosion appelée « solution de simulation de sol ». On obtient cette résolution en reconstituant la composition chimique du sol le plus agressif, qui possède des caractéristiques corrosives telles que la résistivité, la conductivité et le pH (Tableau 13).

Tableau 7 Composition chimique des solutions de sol extrait de divers sites GZ1.
(Si: numéro du sol) [33].

Sites S _i	Masse sol (mg/L)					
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
S ₁	94.60	56	7.6	76.9	736	117
S ₂	18.96	16.44	11.7	47.33	458.4	183
S ₃	----	---	6	7.8	74	218
S ₄	2.00	29.04	1.82	22.69	37.48	160

Tableau 8 Composition chimique de la solution de sol reconstituée en tant que solution de sol la plus agressive appelée « solution artificielle de simulation de sol » choisie pour l'analyse.

Composant	CaSO ₄	MgSO ₄	K ₂ SO ₄	NaCl	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃
Concentration (g/L)	0.02	0.29	0.018	0.23	0.38	0.16

III.3 Essais de corrosion

Les tests de polarisation potentiodynamique ont été réalisés à l'aide d'un Potentiostat/Galvanostat Modèle 273 A, piloté par un logiciel d'analyse de corrosion (Soft corr III). On a réalisé les mesures en utilisant une cellule en verre conventionnelle à trois électrodes d'une capacité de 500 ml, avec une contre-électrode en graphite et une électrode au calomel saturé (SCE) comme référence. L'électrode de travail a été usinée avec une section de 1,8 cm². Le courant et le potentiel dynamiques ont été enregistrés en faisant varier le potentiel de -1 400 mV à -400 mV avec une vitesse de balayage de 1,68 mV/s. Tous les tests ont été réalisés dans des solutions désaérées sous agitation continue à une température constante comprise entre 25 et 50 ± 0,1 °C à l'aide d'un thermostat. Un test de corrosion à potentiel libre a été réalisé (Figure 18). Il montre une stabilisation du potentiel à une valeur d'environ -734 mV après 15 min et une diminution brutale. Les paramètres de polarisation anodique et cathodique ont été étudiés en fonction du pH après 1 h d'immersion, à une température de 25 °C ± 0,1, d'un pH variant de 4,0 à 8,0 à une température de 25 °C (Figure 19), et d'une température dans la plage de 25 à 50°C à pH 6,0 (Figure 20). La gamme de pH a été choisie en simulant un sol où le pH est compris entre 4 et 10, majoritairement acide, contenant un peu de matière organique humifiée.

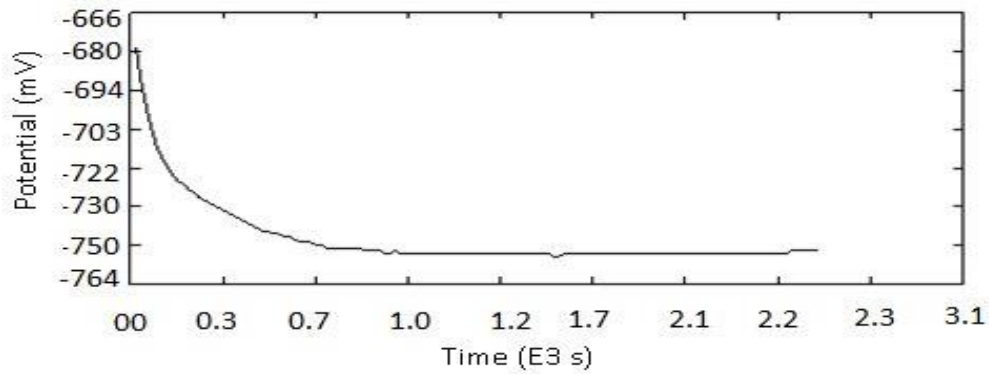


Figure 18 : Evolution du potentiel de corrosion libre en fonction du temps ($t = f(E)$) pour l'acier API 5L X60 immergé dans la solution simulée de sol artificiel.

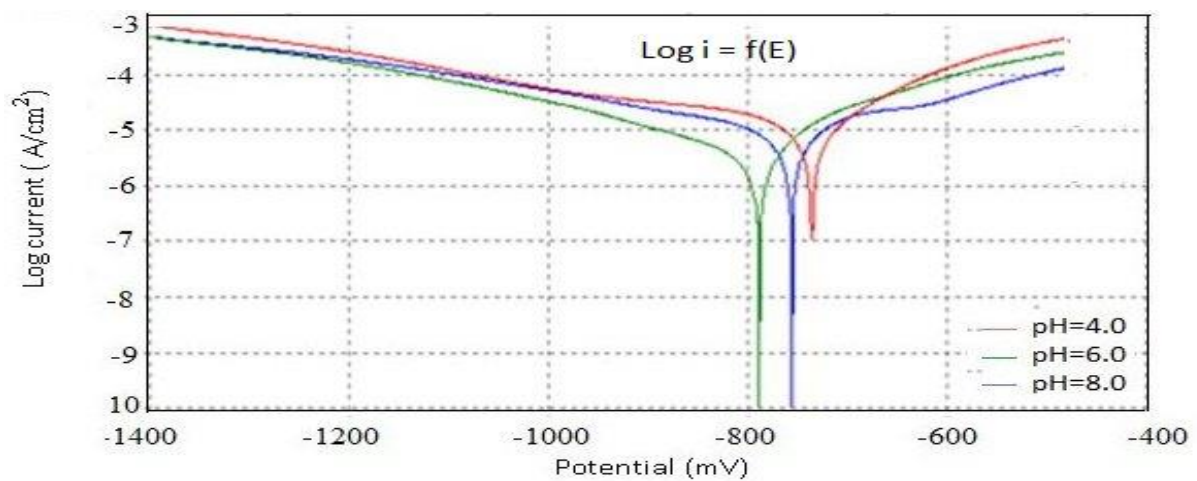


Figure 19 : Courbes de polarisation dans une solution de simulation de sol artificiel à des valeurs de pH comprises entre 4,0 et 8,0 et à une température de 25 °C.

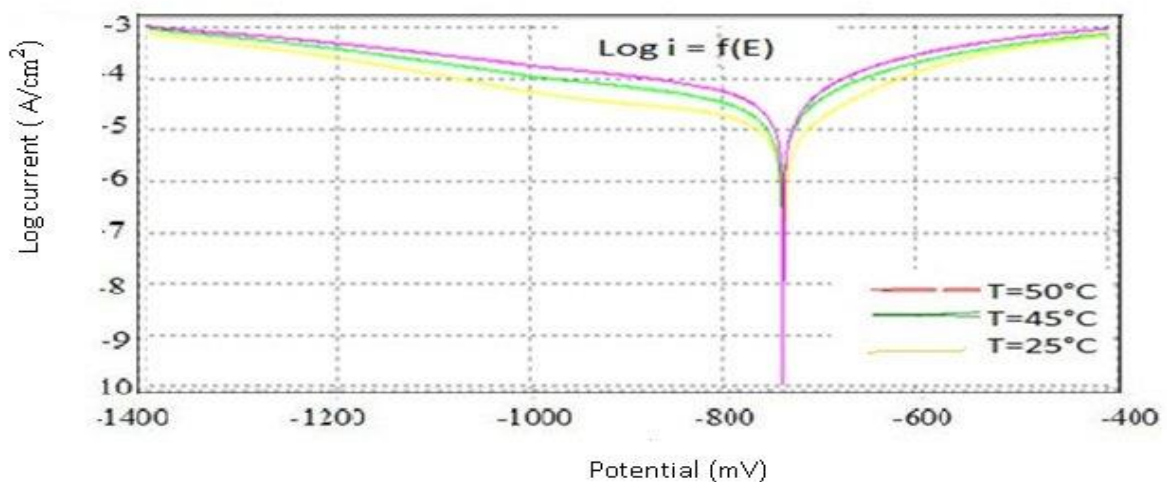


Figure 20 : Courbes une solution de simulation de sol artificiel dans une plage de température de 25 à 50 °C et un pH = 6,0.

III.4 Tests de détection ultrasons des défauts de surface API 5L X60

Les échantillons d'acier contenant quelques défauts artificiels de surface tels que des piqûres de corrosion et des défauts de soudure préalablement usinés selon les dimensions requises et immergés dans la solution de sol artificiel. Ils ont été préalablement traités avec un dégraissage à l'acétone et à l'eau distillée pour éliminer toute présence de graisse et de corps étrangers. On a séché les échantillons sous courant d'air afin d'éviter toute réaction avec l'eau, puis on les a mécaniquement polis avec des papiers abrasifs 600 et 1200. Les échantillons après préparation ont été analysés en laboratoire par des méthodes non destructives utilisant la technique des ultrasons C-scan par immersion et par TOFD "diffraction du temps de vol". Les surfaces des échantillons d'acier ont été exposées à des ondes ultrasonores en modifiant l'angle d'incidence selon la plage. 45°, 60° ou 70°. La génération d'ondes ultrasonores dans l'acier provoque la propagation d'ondes cohérentes qui se propagent dans l'acier pour détecter différents types de défauts. Deux transducteurs, l'un fonctionnant en émission, l'autre en réception, sont placés à équidistance de part et d'autre de l'épaisseur. Le faisceau de chacun des deux transducteurs doit être suffisamment divergent pour couvrir toute l'épaisseur. Les bords des défauts diffractent les ondes ultrasonores et génèrent des échos de défauts. Un logiciel permet l'acquisition des signaux et leur traitement. Pour déterminer la précision des mesures, il est nécessaire d'évaluer certains paramètres tels que la propagation des ultrasons dans l'acier au carbone, la forme et la position des défauts, l'épaisseur à contrôler, ainsi que la fréquence et l'angle d'incidence des transducteurs. Un scanner est nécessaire pour positionner les deux palpeurs de chaque côté de l'épaisseur et installer l'encodeur. L'image obtenue est une représentation transversale de l'épaisseur.

Des tests par ultrasons ont été réalisés sur trois types d'échantillons d'acier : le premier ne contient aucun défaut de surface, le deuxième contient un défaut de surface sous forme de piqûre de corrosion et le troisième contient une piqûre de corrosion avec un défaut de soudure. Les spectres et images ultrasonores sont présentés comme suit. Le spectre ultrasonore du premier échantillon ne contenant aucun défaut de surface a été obtenu par méthode ultrasonore TOFD sur une plaque d'acier (10 × 20 cm) soumise à des ondes ultrasonores diffractées. L'analyse a été réalisée à l'aide de deux transducteurs ultrasonores opposés, l'un fonctionnant en émission et l'autre en réception. Les résultats sont présentés sur la figure 21. Le même premier échantillon a été analysé par la méthode ultrasonore C-scan afin d'examiner la profondeur des imperfections superficielles de l'acier. L'échantillon d'acier et le transducteur ont été immergés dans le réservoir d'eau standard, qui sert de milieu de couplage. Un signal à très haute fréquence (jusqu'à 50 MHz) a été transmis à l'échantillon par un transducteur. Les résultats sont présentés dans la figure 22. Le spectre ultrasonore a été obtenu pour le deuxième échantillon d'acier (10 × 20 cm) contenant des défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion. L'échantillon a été soumis à une onde ultrasonore diffractée par la méthode TOFD et par immersion ultrasonore. Les résultats sont rapportés dans les figures 23 et 24. Le troisième échantillon contient des défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion et de défauts de soudage. Ils ont été caractérisés par la méthode

ultrasonique sans contact et par immersion ultrasonique. Le signal initial est réfléchi vers le transducteur au niveau des interfaces, des défauts et des fortes différences d'impédance acoustique dans l'échantillon les résultats sont rapportés dans les figures 25 et 26. Le reste du signal, s'il n'est pas entièrement réfléchi, continue à travers l'échantillon. Les spectres ultrasonores TOFD des différents échantillons ont montré une couleur rouge correspondant à l'apparition du premier pic du défaut considéré tandis que la couleur verte à l'absence ou à l'apparition du prochain sommet.

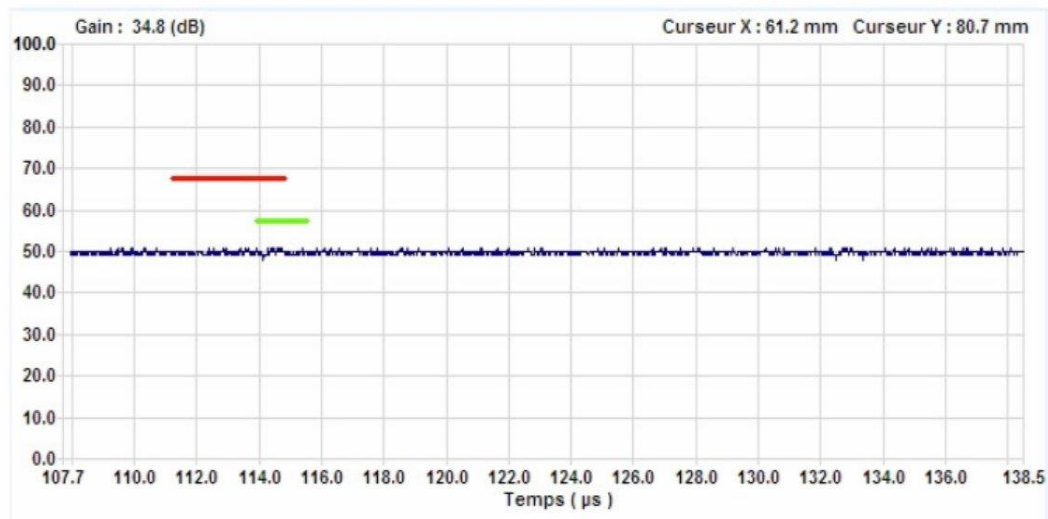


Figure 21 : Spectre ultrasonore TOFD du premier échantillon d'acier (10 × 20 cm) ne contenant aucun défaut de surface. (Temps (µs).)

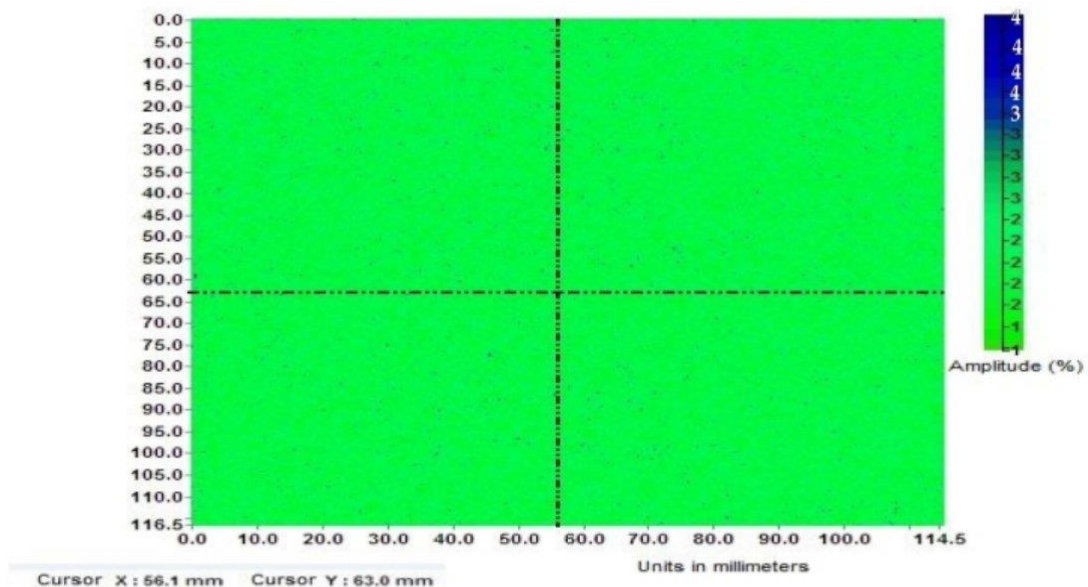


Figure 22 : Spectre ultrasonore C-Scan du premier échantillon d'acier (10 × 10 cm) ne contenant aucun défaut de surface. (Amplitude (%).)

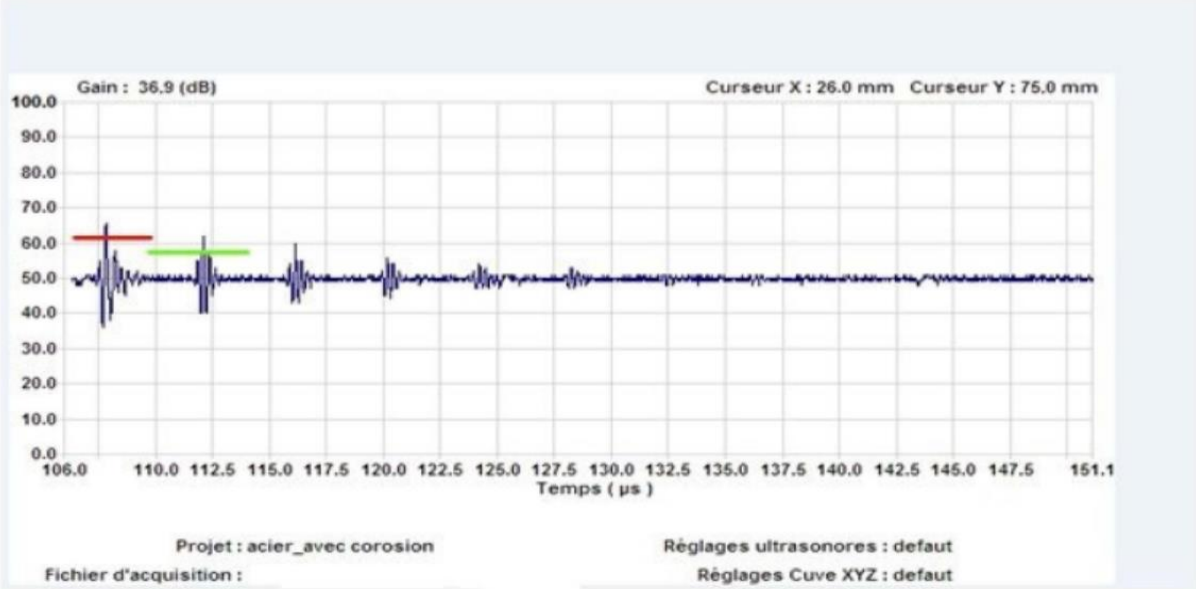


Figure 23 : Spectre ultrasonore TOFD du deuxième échantillon d'acier (10 × 20 cm) contenant un défaut de surface sous forme de piqûre de corrosion (Temps (μ s)).

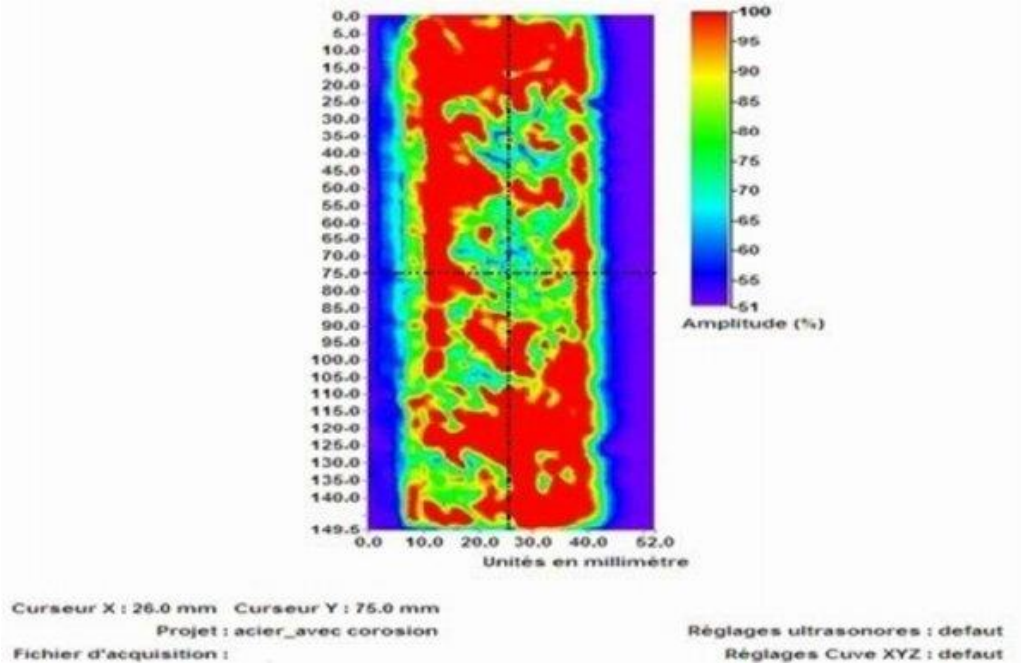


Figure 24 : Image ultrasonore C-scan du deuxième échantillon d'acier (10 × 20 cm) contenant un défaut de surface sous forme de piqûre de corrosion (Amplitude (%)).

III.5 Conclusion

L'acier de pipeline a été caractérisé par des microanalyses sur sa composition chimique et sa microstructure. Des tests sur l'influence du milieu corrosif sur les caractéristiques mécaniques ont été effectués par essai de traction.

Des tests de corrosion de l'acier X60 dans un environnement de sol simulé ont été réalisés par l'emploi de techniques potentiodynamiques en faisant varier la température dans la marge (25 – 50.C) et le pH dans l'intervalle 4.0 – 8.0

Les tests ultrasons ont été effectués sur trois types d'échantillons en utilisant les techniques ultrasons TOFD et C-Scan.

CHAPITRE IV
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

IV .Introduction

Le transport par pipelines en acier présente beaucoup d'avantages et répond aux exigences de sécurité environnementale. Cependant, les aciers sont très susceptibles d'être endommagés par des phénomènes corrosifs après exploitation en raison des réactions chimiques de corrosion avec leur environnement, ce qui entraîne une détérioration des propriétés du matériau, directement et indirectement. Les expertises réalisées sur la ligne GZ1, que ce soit à l'aide d'un outil intelligent à l'ultrason ou d'un piston instrumenté à fuite de flux magnétique, ont montrés que les défauts de surface, tels que les pertes d'épaisseur, les perforations des tubes, la corrosion par piqûres, les défauts de soudure, les fissures, etc., sont causés par la corrosion et représentent la majorité des défauts identifiés, soit 93,6% de la totalité des défauts identifiés, qu'ils soient internes ou de fabrication. Ces défauts sont les conséquences de diverses sollicitations électrochimiques de l'acier nu avec le sol après défaillance de la protection par revêtement passif et protection cathodique active. Les risques de défauts résultant de l'interaction chimique externe sont des phénomènes préoccupants dans l'industrie pétrolière et les laboratoires de recherche sont les principales menaces pouvant réduire l'intégrité structurelle du système de transport des pipelines, ce qui nécessite une connaissance des mécanismes de corrosion par les sols, de l'influence des paramètres physiques et des moyens d'identification et de caractérisation des défauts.

Afin d'analyser en laboratoire le phénomène de corrosion de l'acier au carbone, nous avons utilisé une solution de sol artificielle en s'approchant du contexte industriel en utilisant comme solution de sol simulée, une solution reconstituée chimiquement choisie comme composition de sol la plus corrosive parmi les compositions de sol analysées là où le pipeline est enterré et l'acier est endommagé. Les paramètres électrochimiques ont été déterminés à l'aide de techniques électrochimiques en faisant varier les paramètres physiques tels que la température, le pH et l'influence des contraintes mécaniques. La composition chimique de l'acier et sa microstructure ont été analysées. Les défauts de surface de l'acier ont été identifiés par les techniques non destructives. Nous avons utilisé des échantillons contenant des piqûres de corrosion artificielle et des défauts de soudage après exposition en milieu simulé ont été analysés par des méthodes d'analyse par ultrasons (C-scan et TOFD).

IV.1 Propriétés de l'acier

Les valeurs mesurées des caractéristiques chimiques de l'acier API 5LX60 ont été obtenues par analyse spectrophotométrique. L'acier est du type micro-allié à haute limite élastique (HLE) et à faible teneur en carbone assurant une bonne résistance à la corrosion et aux paramètres mécaniques et une bonne soudabilité. Le manganèse, qui se présente sous la forme de Mn S, ou carbure Mn_3C , associé à la cémentite Fe_3C , améliore la dureté et la capacité de trempe de l'acier et limite l'effet nocif du soufre sous sa forme combinée. La teneur élevée en phosphore dans sa combinaison avec la ferrite a un effet néfaste en provoquant un grossissement des grains, cela accroît la vulnérabilité à froid de l'acier tout en diminuant la plasticité et la ductilité. L'affinement du grain ferritique augmente la résistance l'acier. Les résultats des caractéristiques chimiques ont été comparés aux valeurs standards de la norme API [2]. Ce qui montre que l'acier suit la norme en ayant des valeurs appropriées dans sa composition.

Après avoir analysé la microstructure, il a été constaté que l'acier X60 possède une microstructure fine de type ferrite-perlitique, avec une majorité de ferrite affinée avec des amas de perlite. Il y a eu quelques inclusions, ce qui suggère la présence probable de sulfures de manganèse. L'affinement de la granulométrie ferri-tique obtenu par différents mécanismes de durcissement et de précipitation lors de la fabrication de l'acier a pour conséquence d'avoir une meilleure résistance à la corrosion.

Les mesures des propriétés mécaniques de l'acier étudié ont été effectuées à température ambiante à partir des éprouvettes de traction préalablement usinées selon les dimensions d'essais standardisées requises. Les valeurs obtenues sont reportées dans le tableau 14 des principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Les valeurs ont été comparées aux valeurs standards. L'acier est conforme à la norme API.

Les caractéristiques mécaniques ont été déterminées afin de considérer l'influence éventuelle de la corrosion, qui peut générer certains défauts de surface par contraintes mécaniques en plus de l'interaction électrochimique de l'acier avec le sol après défaillance du système de protection mettant l'acier à nu. Les résultats (Tableau 11) ont montré que les valeurs des caractéristiques mécaniques ont changé sous l'effet des contraintes mécaniques et de l'interaction de la solution du sol suite à l'immersion dans la solution du sol simulée pendant une durée de 168 h à 2 160 h obtenues par des essais de traction à température ambiante. La résistance à la rupture diminue progressivement au fil du temps de 664 MPa à 560 MPa après une immersion de 672 h. Cette baisse recul est principalement attribuable à la durée d'immersion de l'échantillon dans la solution du sol, qui est à l'origine d'une dégradation directe des caractéristiques mécaniques de l'acier. Après 2160 h d'immersion, la résistance à la rupture augmente jusqu'à 653 Mpa mais n'atteint pas la valeur initiale. Cette augmentation réside dans la création d'une couche d'oxyde protectrice en surface, qui préserve l'acier de la corrosion et donc de toute détérioration ultérieure. Le temps de résistance de cette couche de

protection n'a pas été déterminé car les tests n'ont pas été poursuivis au-delà d'un temps d'immersion de 2160 h. Cette couche finira par se dégrader, ce qui provoquera une rupture ductile encore plus fragile. On exprime la rupture par striction notée Z en pourcentage. Elle est caractérisée par une diminution de la section de la zone de déformation par striction lors de la rupture. La striction avait initialement une valeur de 23,91 % après immersion progressive dans la solution du sol pendant des durées variables. Les valeurs de striction sont relativement invariables, ce qui explique que la durée d'exposition de l'éprouvette dans la solution de sol simulée n'a pas eu un impact significatif sur l'allongement et les valeurs de déformation par striction.

Les résultats des caractéristiques mécaniques montrent que le processus de corrosion peut être accentué lorsque l'acier en plus de ses interactions électrochimiques avec la solution du sol est sollicité par des contraintes mécaniques. La corrosion sous contrainte peut survenir près du potentiel de piqûre ou du potentiel de passivation, ce qui explique le laps de temps minimum nécessaire jusqu'à la rupture. La corrosion sous contrainte peut se produire dans les régions potentielles qui présentent des caractéristiques communes telles que la stabilité du film passif est réduite et que le métal peut facilement passer de l'état actif à l'état passif et inversement.

IV.2 Corrosion de l'acier API 5L X60 en sol

L'étude de la corrosion de l'acier API 5LX60 en sol a été effectuée en simulant au laboratoire le contexte industriel en considérant une solution de sol artificiel reconstitué à partir d'analyses chimiques de sols prélevés sur différents sites (Tableau 12), en choisissant la solution la plus agressive en utilisant les techniques électrochimiques potentiodynamiques.

Les courbes courant-potentiel (i-E) ont été obtenus en modifiant le potentiel. Les paramètres de polarisation anodique et cathodique ont été étudiés en fonction du pH et de la température (figures 19 et 20).

La corrosion de l'acier à potentiel libre (figure 18) montre une évolution précoce du potentiel élevé vers des valeurs plus négatives, ce qui indique que la surface de l'acier subit des réactions de corrosion et l'interface entre l'électrode et l'électrolyte est altérée. Une stabilisation du potentiel à une valeur d'environ -734 mV a été obtenue après une diminution brutale, ce qui correspond à la valeur du potentiel de corrosion (E_{corr}) de l'acier dans la solution de sol.

Les courbes de polarisation indiquent que la corrosion de l'acier varie en fonction du pH. Lorsque les valeurs de pH baissent vers un pH neutre ou acide dans la plage de 4,0 à 8,0, cela entraîne une augmentation de la corrosion de l'acier, une diminution de la résistance de polarisation et une tendance à un potentiel de corrosion anodique. Les résultats de pH sont tout à fait inverses lorsque le milieu est basique (pH= 8,0), la résistance de l'acier à la corrosion diminue et la résistance à la polarisation augmente. Une solution de sol simulant désaérée a été utilisée dans des conditions d'agitation continue à température constante et barbotage d'azote afin de désoxygéner la solution et d'éviter toute corrosion due à l'effet des

réactions de pH et d'oxygène, qui favorise le taux de corrosion. Selon la littérature, lorsque l'acier est exposé à des sols aérés humides contenant de l'oxygène dissous, la vitesse de corrosion dépendra de la vitesse à laquelle l'oxygène réagit avec l'hydrogène atomique absorbé, dépolarisant ainsi la surface et permettant à la réaction de réduction de se produire.

Dans la plage de température de 25°C à 50°C, les courbes de polarisation ont révélé que la corrosion de l'acier varie en fonction de la température. L'intensité du courant de corrosion augmente à mesure que la température augmente. L'acier immergé dans la solution du sol simulé présente un potentiel de corrosion négatif à mesure que la température augmente. Les lignes de Tafel sont droites et parallèles dans les courbes de polarisation anodique. Dans la plage étudiée, la réaction de réduction de l'hydrogène sur la surface de l'acier se produit selon le mécanisme d'activation. La température entraîne une augmentation de l'énergie d'activation de la corrosion. Ces valeurs sont confirmées par la littérature. Les variations des paramètres électrochimiques sous l'effet de la température dans la gamme étudiée 25–50°C pour un pH proche du neutre confirment l'effet de la température sur la corrosion de l'acier en conditions réelles où le sol du fait de la variation de la température saisonnière où la différence est importante. Les interactions électrochimiques de l'acier avec le sol environnant peuvent être modifiées.

Les résultats de corrosion obtenus à partir de solutions de sols artificiels simulés ont montré que les tubes en acier des gazoducs sont sensibles à la corrosion lorsque la protection est défaillante. Le phénomène de corrosion est accentué par certains paramètres tels que les caractéristiques du sol, le pH, la composition du sol, la résistivité, la teneur en eau, ainsi que les contraintes mécaniques. Selon la littérature [32], l'affinement du grain de l'acier améliore la résistance à la corrosion.

IV .3 Détection des défauts de surface de l'acier API 5L X60 par les techniques ultrasons C-Scan et TOFD

L'existence de deux modes de vibration longitudinale et transversale explique la propagation des ultrasons dans les solides à des vitesses différentes. La vibration des atomes métalliques est parallèle à la direction de propagation en mode longitudinal, tandis qu'en mode transversal, la vibration est perpendiculaire à la propagation. Pour un acier sans défaut, la vitesse des ondes longitudinales est de 5940 m•s⁻¹ et la vitesse des ondes transversales est de 3265 m•s⁻¹. Les paramètres spécifiques du matériau en acier, tels que le module d'élasticité longitudinal, la densité et le coefficient de frottement, influencent la vitesse de propagation des ondes [31].

Des échantillons d'acier contenant certains défauts de surface artificiels tels que piqûre de corrosion et un défaut de soudure ont été analysés en laboratoire par des méthodes non destructives par ultrasons utilisant la méthode ultrasonore par onde ultrasonore diffractée TOFD et par immersion C-Scan. L'étude a été menée en utilisant deux transducteurs ultrasonores opposés, l'un fonctionnant en émission, l'autre en réception, placés à équidistance de part et d'autre de l'épaisseur. Les bords des défauts diffractent les ondes ultrasonores et

gènèrent des échos de défauts. Ils ont également été analysés par la méthode des ultrasons en immersion afin d'examiner la taille des imperfections superficielles de l'acier. L'échantillon d'acier et le transducteur ont été immergés dans le réservoir d'eau standard, qui sert de milieu de couplage. Un signal à très haute fréquence (jusqu'à 50 MHz) a été transmis à l'échantillon par un transducteur. Les surfaces des échantillons ont été exposées à des ondes ultrasonores en modifiant l'angle d'incidence selon la plage 45°, 60° ou 70°. La génération d'ondes ultrasonores dans l'acier provoque la propagation d'ondes cohérentes qui se propagent dans l'acier pour détecter différents types de défauts. Un logiciel facilite l'acquisition et le traitement des signaux.

Les spectres ultrasoniques ont été effectués selon trois types d'échantillons d'acier : le premier ne contient aucun défaut de surface, le deuxième contient un défaut de surface sous forme de piqûre de corrosion et le troisième contient une piqûre de corrosion avec un défaut de soudure. Le premier échantillon d'acier ne contenant aucun défaut de surface caractérisé par la méthode ultrasonore sans contact et par immersion ultrasonore a montré que l'onde ultrasonore diffractée se produisant aux bords des défauts n'apparaît pas (Figure 21). Le signal initial n'a pas été réfléchi vers le transducteur, entraînant l'absence du défaut. Le signal reste stable à tous les instants de 0 à 138,2 μ s à une amplitude maximale de 50 dB. L'image ultrasonore C-scan obtenue par la technique de cartographie après projection des données ultrasonores dans une vue en plan de l'échantillon d'acier où ne contenant aucun défaut de surface (Figure 22) présente une réflexion unique qui ne change pas même lorsque l'amplitude des curseurs x et y varient. L'image est partiellement nette, avec une répartition unique même pour une variation de l'amplitude des curseurs qui montre clairement l'absence de défauts de surface. Ces résultats indiquent que le premier échantillon d'acier ne contenant pas de défaut présente une image par simple réflexion du faisceau ultrasonore sur des interfaces ayant les mêmes impédances acoustiques.

Le deuxième échantillon d'acier contenant des défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion analysé par la méthode ultrasonique sans contact et par immersion ultrasonique a montré le spectre ultrasonore rapporté dans les figures 23 et 24. Après propagation des ondes ultrasonores, l'onde ultrasonore réfléchie diffractée se produisant aux bords des défauts apparaissent du fait de la présence d'un défaut de corrosion. Lorsqu'un faisceau ultrasonore est confronté à un obstacle, comme des piqûres de corrosion, l'analyse du temps de vol des signaux de diffraction réémet des ondes omnidirectionnelles. Les spectres ultrasoniques TOFD (Figure 23) montrent à un temps de 108,2 μ s et une amplitude maximale d'environ 62 dB, mais le signal était encore considérable à 112,5 μ s et 115,3 μ s et l'amplitude du signal était presque égale au niveau de bruit. L'image de l'échantillon d'acier contenant le défaut de surface des piqûres de corrosion (Figure 24) présente une distribution résultant de la réflexion de surface incluant le défaut de corrosion après variation de l'amplitude des curseurs x et y. Ces résultats indiquent que le deuxième échantillon d'acier contenant des défauts présente une image par réflexion du faisceau ultrasonore sur des interfaces ayant des impédances acoustiques différentes. D'après les résultats, la présence de défauts de corrosion sur la surface

de l'acier a altéré la transmission des ondes ultrasonores transversales à travers l'acier, montrant une légère augmentation de $3437,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ selon l'équation (9) par rapport à la vitesse théorique de propagation des ondes dans l'acier sans défauts de $3265 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La vitesse transversale de propagation des ultrasons à travers la plaque incluant le défaut de corrosion est :

La vitesse transversale de propagation des ultrasons à travers la plaque incluant le défaut de corrosion est :

$$V_T = \frac{2d}{\Delta T} \quad (8)$$

Où

V_T : vitesse transversale $2d$: distance ΔT : temps d'émission et de réflexion.

$$V_T = \frac{110}{3.2} = 34.375 \mu\text{s} = 3437.5 \text{ m/s} \quad (9)$$

Le troisième échantillon contient des défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion et de défauts de soudure. La méthode ultrasonique sans contact et l'immersion ultrasonique ont été utilisées pour les caractériser. (Figures 25 à 26). Le signal initial est réfléchi vers le transducteur au niveau des interfaces, des défauts et des différences d'impédance acoustique dans l'échantillon. Après que les ondes ultrasonores se propagent sur l'échantillon soudé comportant un défaut par corrosion, l'onde ultrasonore diffractée se produit aux bords des défauts ; cela indique que les défauts de soudure sont confinés au centre de la plaque, et on constate la propagation de la corrosion sur la majeure partie de la plaque avec le temps. Le premier défaut représente le défaut de soudure en bord de plaque. Les spectres ultrasonores TOFD (Figure 9) montrent à un instant de $123,1 \mu\text{s}$ une amplitude maximale d'environ 93 dB. Tous les défauts typiques de soudage sont détectés. Il existe de petits interstices au niveau de la soudure qui augmentent en taille avec le temps en raison du deuxième défaut de corrosion détecté. L'image ultrasonore C-scan de l'échantillon d'acier contenant des piqûres de corrosion et une soudure (Figures 24 et 25) présente une distribution différente résultant de ces défauts et une variation différente de l'amplitude. Ces résultats indiquent que le troisième échantillon d'acier contenant un défaut présente une image par réflexion du faisceau ultrasonore sur des interfaces ayant des impédances acoustiques différentes. Les résultats ont également montré que la présence de défauts sur la surface de l'acier a modifié la propagation des ondes ultrasonores transversales à travers l'acier, montrant une forte augmentation de $4621,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ selon l'équation (10) par rapport à la vitesse théorique dans l'acier sans défauts. Les défauts de surface augmentent et la vitesse transversale de propagation des ultrasons à travers la plaque, y compris les défauts, augmente.

$$V_T = \frac{122}{2.64} = 46.2121 \mu\text{s} = 4621.21 \text{ m/s} \quad (10)$$

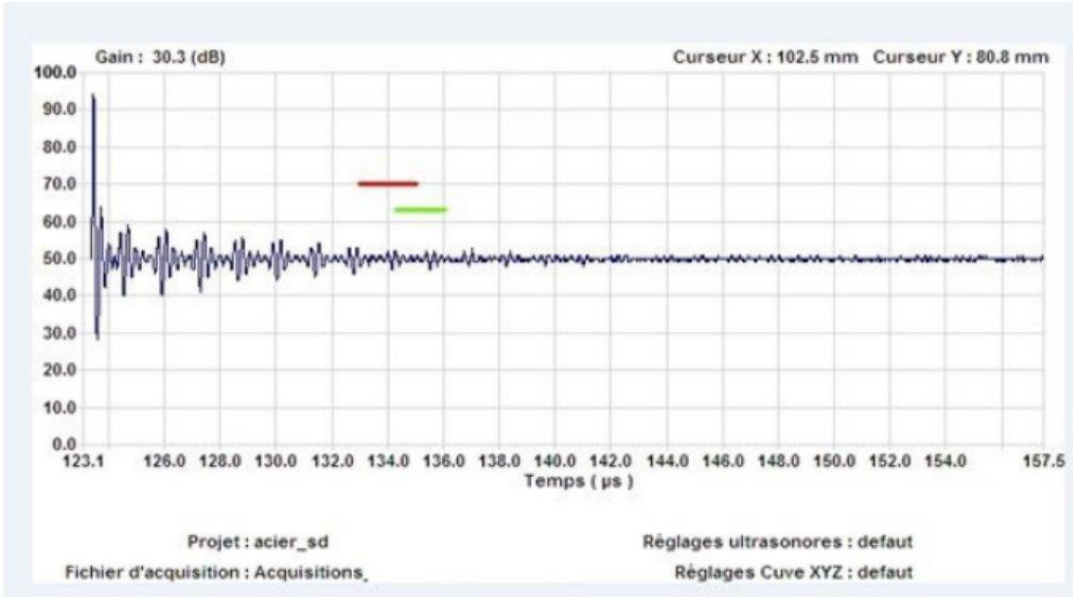


Figure 25 : Spectre ultrasonore TOFD du troisième échantillon d'acier (10 × 20 cm) contenant plus de défauts de surface tels que des piqûres de corrosion et des défauts de soudure (Temps (μ s)).

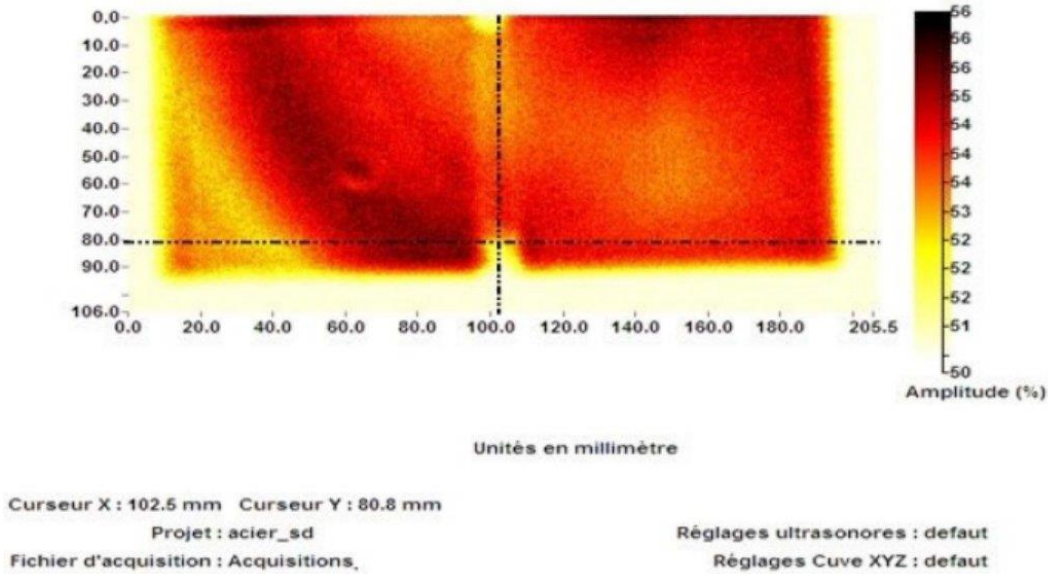


Figure 26 Image ultrasonique C-scan du troisième échantillon d'acier (10 × 20 cm) contenant des défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion et de défauts de soudure (Amplitude (%)).

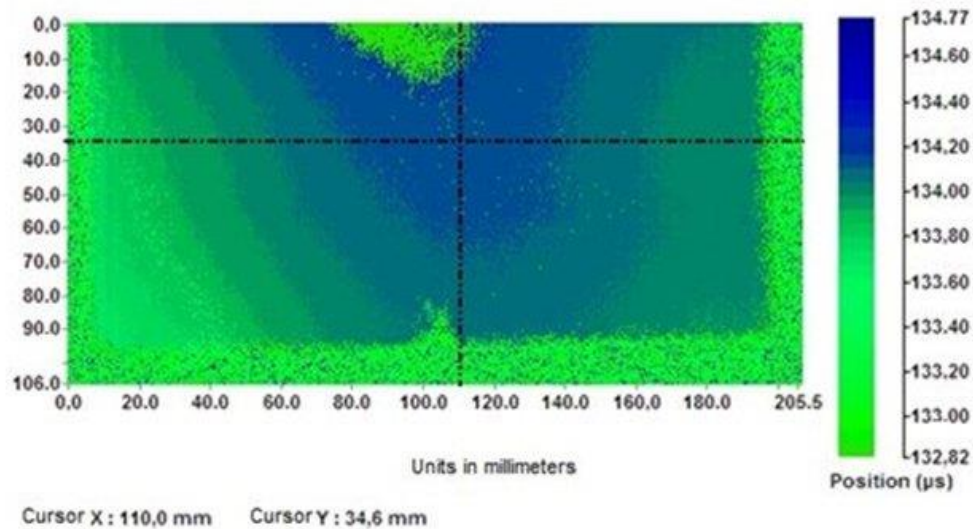


Figure 27 Image ultrasonique C-scan du troisième échantillon d'acier (10 × 20 cm) contenant des défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion et de défauts de soudure ((Position (µs)).

IV .4 Conclusion

D'après les résultats obtenus, il a été montré que l'acier API 5L X60 est extrêmement vulnérable à la corrosion lorsque le système de protection de l'acier fait défaut, ce qui entraîne sa détérioration par corrosion. La dégradation par corrosion est accentuée par un certain nombre de paramètres comme la température le pH et les caractéristiques du sol tel que la résistivité, la nature du sol, l'humidité... Les tests de traction de l'échantillon après leur immersion dans la solution corrosive ont montrés que les caractéristiques mécaniques ont été modifiés.

La détection des anomalies de surface a été effectuée par la méthode ultrasonore sans contact TOFD et par immersion ultrasonore C-Scan. L'échantillon d'acier ne contenant aucun défaut de surface a montré que l'onde ultrasonore diffractée se produisant aux bords des défauts n'apparaît pas. Le signal initial n'a pas été réfléchi vers le transducteur, entraînant l'absence du défaut. Le signal reste stable à tous les instants de 0 à 138,2µs à une amplitude maximale de 50 dB. L'image ultrasonore C-scan obtenue présente une réflexion unique qui ne change pas même lorsque l'amplitude des curseurs x et y varient. L'image est partiellement nette, avec une répartition unique même pour une variation de l'amplitude des curseurs qui montre clairement l'absence de défauts de surface. Lorsque l'échantillon contient des défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion, l'onde ultrasonore réfléchi diffractée se produisant aux bords des défauts apparaissent du fait de la présence d'un défaut de corrosion. Les spectres ultrasoniques TOFD montrent à un temps de 108,2 µs et une amplitude maximale d'environ 62 dB. L'image de l'échantillon d'acier contenant le défaut de surface des piqûres de corrosion présente une distribution résultant de la réflexion de surface incluant le

défaut de corrosion après variation de l'amplitude des curseurs x et y. Ces résultats indiquent que le l'échantillon d'acier contenant des défauts présente une image par réflexion du faisceau ultrasonore sur des interfaces ayant des impédances acoustiques différentes. La propagation des ondes ultrasonores transversales à travers l'acier, montrent une légère augmentation

Lorsque l'échantillon contient des défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion et de défauts de soudure, le signal initial est réfléchi vers le transducteur au niveau des interfaces, des défauts et des différences d'impédance acoustique dans l'échantillon. Après que les ondes ultrasonores se propagent sur l'échantillon soudé comportant un défaut par corrosion, l'onde ultrasonore diffractée se produit aux bords des défauts ; cela indique que les défauts de soudure sont confinés au centre de la plaque, et on constate la propagation de la corrosion sur la majeure partie de la plaque avec le temps. Le premier défaut représente le défaut de soudure en bord de plaque.

Conclusion générale et perspectives

Le processus de corrosion de l'acier X60 a été étudié en utilisant une solution de sol artificiel reconstitué chimiquement choisie comme composition de sol la plus corrosive. Les méthodes de test par ultrasons C-scan et TOFD ont été utilisées pour détecter et caractériser les défauts de surface de l'acier sous forme de défauts de corrosion et de défauts de soudure. Les conclusions suivantes ont été obtenues :

- Les résultats de la composition chimique effectuée par spectrophotométrie et Les propriétés mécaniques de l'acier résultant de l'essai de traction suivent la norme standard API pour l'acier API 5 L X60.
- La microstructure de l'acier d'étude est de type ferrite-perlitique avec une prédominance de grain ferritique fines avec des amas de perlite.
- Les tests potentiodynamiques de corrosion de l'acier en sol simulé ont montrés que l'acier est susceptible d'être corrodé par le sol lorsque la protection est défailante en particulier dans les sols à faible résistivité. La corrosion est accentuée par certaines caractéristiques du sol comme le pH, la nuance, la composition chimique du sol, la résistivité, la teneur en eau, et les contraintes mécaniques.
- Les tests ultrasoniques TOFD et C-Scan ont montrés que l'onde ultrasonore diffractée se produisant aux bords des défauts n'apparaît pas pour les aciers ne contenant aucun défaut. Le signal initial n'a pas été réfléchi vers le transducteur, qui reste stable à tout instant. L'image ultrasonore présente une seule réflexion, qui ne change pas par variation d'amplitude. Le faisceau ultrasonore sur les interfaces aux mêmes impédances acoustiques.
- L'onde ultrasonore réfléchi et diffractée se produisant aux bords des défauts de piqûres de corrosion apparaît en raison de la présence d'une image ultrasonore de défaut, qui présente une répartition résultant de la réflexion superficielle incluant un défaut de corrosion après variation de l'amplitude. Le faisceau ultrasonore sur les interfaces à différentes impédances acoustiques.
- On a observé une légère augmentation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores transversales à travers l'acier avec des défauts de surface, comparée à la vitesse théorique de propagation des ondes dans l'acier sans défauts.
- L'onde ultrasonore diffractée se produit sur les bords de l'acier défectueux sous la forme de piqûres de corrosion et de défauts de soudage, ce qui indique que les défauts soudés sont confinés au centre de la plaque. Le premier défaut représente le défaut de soudure. Il existe de petits interstices au niveau de la soudure, dont la taille augmente avec le temps en raison des seconds défauts de corrosion détectés. L'image ultrasonore présente une distribution résultant de différentes variations de l'amplitude et de différentes impédances acoustiques.

- La vitesse à laquelle les ondes ultrasons se propagent transversalement à travers la plaque contenant les défauts de surface sous forme de piqûres de corrosion et de défauts de soudure, est modifiée, montrant une augmentation due à la présence de ces défauts.
- Les techniques ultrasons ont été appliquées dans de nombreux systèmes et structures comme dans les ouvrages de pipelines. Ce sont des ondes mécaniques qui se propagent dans les milieux élastiques. Dans le contexte industriel, elle est utilisée comme technique robotique industrielle intelligente où les outils d'acquisition et de traitement des données sont automatiques et autonomes avec un haut niveau de détection.
- La détection des défauts de surface, leur nature, leur localisation et leur taille en planifiant des inspections régulières en ligne en utilisant l'outil à ultrasons ou le pic instrumenté à perte de flux magnétique permettent de définir une stratégie de maintenance et de limiter les arrêts.
- Développer des techniques numériques pour étudier les phénomènes de corrosion en intégrant les différents paramètres influant comme la diffusion d'oxygène et la production et la précipitation de produits de corrosion et leur influence sur la dynamique d'équilibre d'un système de corrosion, le système de protection.
- Les études futures devraient viser à mieux comprendre les phénomènes de corrosion pour développer des méthodes avancées de tests non destructifs et de protection contre la corrosion à partir de sources naturelles, des méthodes économiques et pratiques utilisant de nouvelles formulations de protection écologiques, biodégradables et non toxiques selon le concept de développement durable [34].

Références Bibliographiques

- [1] R. Piestner, the origin of fine – grained ferrite in steels rolled under controlled conditions, Conférence paper, Journée international de sidérurgie, Paris 4 octobre 1974, Revue de métallurgie Avril 1975
- [2] API Specification 5L (SPEC 5L), Specification for Pipe, 14th ed.; American Petroleum Institute: Washington, DC, USA, 46th Edition Updated on 2023. Available online: <https://www.octalsteel.com/api-5l-pipe-specification>.
- [3] DRC Sonatrach Bethioua. Direction of Pipeline Treatment, Online Inspection and Diagnosis by. Group limited Canada''-PII. 2004.
- [4] Terbal.A Réseau de transport par canalisation TRC et la demarche maintenance mise en œuvre. Journée d'études - Pipeline Integrity Management Algiers 2006
- [5] Halitim A, (1988). Les sols des régions arides d'Algérie. Ed. O. P. U, Alger. 384 p.
- [6] S.K. Gupta, B.K. Gupta, Critical soil-moisture content in the underground corrosion of mild-steel, Corrosion Science 19 (1979) 171–178.
- [7] Angela, La relation entre la résistivité du sol et la corrosion, (2021) Dreiyim Engineering <https://www.dreiyim.com/fr/2021/07/30/la-relation-entre-la-resistivite-du-sol-et-la-corrosion/>
- [8] Leblond Jean-Baptiste, Mécanique de la rupture fragile et ductile, Coll. Études en mécanique des matériaux et des structures, Lavoisier (2003), 196p
<https://www.lavoisier.fr/livre/materiaux/mecanique-de-la-rupture-fragile-et-ductile/leblond/descriptif-9782746207516>
- [9] Dr. Lyes Bidi, Contrôle Non Destructif (CND), Cours, 3ième Année PMI, Institut des Sciences et Techniques Appliquées «ISTA» ,Université Frères Mentouri Constantine1, (2018) https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/Cours_CND_2018_L3_PMI.pdf
- [10] Jacques Dumont – Fillon, Principes de détection des défauts. Différentes techniques du Contrôle non destructif (CND), Technique de l'ingénieur (1996), R1400
- [11]Wissam M. Alobaidi, Entidhar A. Alkuam, Hussain M. Al-Rizzo, Eric Sandgren, Applications of Ultrasonic Techniques in Oil and Gas Pipeline Industries: A Review, American Journal of Operations Research, Vol.05 No.04(2015), Article ID:57745,13 pages [10.4236/ajor.2015.54021](https://doi.org/10.4236/ajor.2015.54021)
- [12] Carreóna , G. Barreraa , C. Natividadab, M. Salazarb and A. Contrerasb Relation between hardness and ultrasonic velocity on pipeline steel welded joints, Nondestructive Testing and Evaluation, (2016) Vol. 31, N°. 2, 97–108
<http://dx.doi.org/10.1080/10589759.2015.1074231>
- [13] Herlina Abdul Rahima, KhairulanamAbdHamida and Hafilah Zainal Abidin, Early Detection of Pipeline Leakage Using Ultrasonic Sensor, JurnalTeknologi (Sciences & Engineering) 73:3 (2015), 9–11 www.jurnalteknologi.utm.my
- [14] Hecht, A. Time of Flight Diffraction Technique (TOFD) An Ultrasonic Testing Method for all Applications. *NDT J.* (1997)
- [15] Zoran Bergant , Joseph Janez and JanezGrum, ultrasonic c-scan testing of epoxy/glass fiber composite, The 14th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing »Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering« September 4-6, 2017, Bernardin, Slovenia
- [16] DRC SonatrachBethioua. Direction of Pipeline Treatment, Online Inspection and Diagnosisby. Group limitedCanada''-PII. 2004.
- [17]Krautkrämer,J.;Krautkrämer,H.Ultrasonic Testing of Materials,3rded.;Springer:Berlin/Heidelberg,Germany,1983.<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-02357-0>
- [18]Akkouche,R.;Rémazeilles,C.;Jeannin,M.;Barbalat,M.;Sabot,R.;Refait,P.Influenceofsoilmoistureonthecorrosionprocessesofcarbonsteelinartificialsoil:Activeareaandaerationcells.*Electrochim.Acta*2016, 213, 698–708.

- [19] Benmoussat, A. and Hadjel, M. Corrosion behavior of low carbon line pipe in soil environment. *J. Corros. Sci. Eng.* **2005**, vol. 7, 147156. DOI - 10.18321/ectj626
- [20] Pérez, T.; Domínguez-Aguilar, M.A.; Alamilla, J.L.; Liu, H.; Contreras, A.; Ake, L.M.Q. Corrosion behavior of low carbon steels and non-ferrous metals exposed to a real calcareous soil environment. *De Gruyter* 2022 <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/corrrev-2021-0008/pdf>
- [21] Arriba-Rodriguez, L.-D.; Villanueva-Balsera, J.; Ortega-Fernandez, F.; Rodriguez-Perez, F. Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel Structures: A Review. *Metals* 2018, 8(5), 334; <https://doi.org/10.3390/met8050334>
<https://www.mdpi.com/2075-4701/8/5/334>
- [22] Velázquez, J.C.; Hernández-Sánchez, E.; Terán, G.; Capula-Colindres, S.; Diaz-Cruz, M.; Cervantes-Tobón, A. Probabilistic and Statistical Techniques to Study the Impact of Localized Corrosion Defects in Oil and Gas Pipelines: A Review. *Metals* 2022, 12(4), 576; <https://doi.org/10.3390/met12040576>. <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/4/576>
- [23] Akhlaghi, B.; Mesghali, H.; Ehteshami, M.; Mohammadpour, J.; Salehi, F.; Abbassi, R. Predictive deep learning for pitting corrosion modeling in buried transmission pipelines. *Process Saf. Environ. Prot.* 2023, 174, 320–327. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.010>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582023002975>
- [24] May, Z.; Alam, K.; Nayan, N.A. Recent Advances in Nondestructive Method and Assessment of Corrosion Undercoating in Carbon–Steel Pipelines. *Sensors* 2022, 22(17), 6654; <https://doi.org/10.3390/s22176654>
<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/17/6654>
- [25] Bourenane, K.; Haddar, A.B.; Haddar, A.; Zerouki, I.; Abdessemed, D. Monitoring and inspection to combat corrosion of pipelines in an oil field. *Alger. J. Environ. Sci. Technol.* Vol 9, No 4 (2023) <https://www.aljest.net/index.php/aljest/article/view/911/796>
- [26] Nabil, Y.; Toufik, B.; Morad, G. Ultrasonic TOFD Technique for Cracks Sizing and Locating Based on PSO. In Proceedings of the First International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technologies, ICEEAT23, Batna, Algeria, 5–7 November 2023.
- [27] Rodriguez, C.; Fernández, M.; Domínguez, J.; Biezma, M.V. Detection of defects in metallic specimens supported by ultrasound propagation simulations. *Mater. Test.* 2014, 56, 386–392. <https://doi.org/10.3139/120.110572>
<https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/120.110572/html>
- [28] DRC Sonatrach Bethioua. Direction of Pipeline Treatment, Online Inspection and Diagnosis by Group limited Canada? - PII. 2004.
- [29] Sonatrach/ [activite transport par canalisation](#) /Description du réseau de transport par canalisation des hydrocarbures, (2021)
- [30] Hafifi, M., Meddah, M. Rapport d'expertise sur la conduite du gazoduc GZ1 40'', Station de traitement des tubes (STT), Sonatrach-DRC, Bethioua - Oran. 2000
- [31] API Specification 5L (SPEC 5L), Specification for Line Pipe, 14th ed.; American Petroleum Institute: Washington, DC, USA, 46th Edition Updated on 2023.
- [32] Belmokre, K.; Azzouz, N.; Kermiche, F.; Wery, M.; Pagetti, J. Corrosion study of carbon steel protected by a primer, by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) in 3% NaCl medium and in a soil simulating solution. *J. Mater. Corros.* 1998, 49, 108–113. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4176\(199802\)49:2<108::AID-MACO108>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4176(199802)49:2<108::AID-MACO108>3.0.CO;2-P)
- [33] Hansen, N. Hall–Petch relation and boundary strengthening. *Scr. Mater.* 2004, 51, 801–806. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.002>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646204003434>
- [34] Lahrou, S.; Benmoussat, A.; Bouras, B.; Mansri, A.; Tannouga, L.; Marzorati, S. Glycerin-Grafted Starch as Corrosion Inhibitor of C-Mn Steel in 1M HCl solution. *Appl. Sci.* 2019, 9, 4684. <https://doi.org/10.3390/app9214684>.

Annexe A

Liste des Travaux scientifiques

Publication:

Fatima Benkhedda, Ismail Bensaid, Abderrahim Benmoussat, Sid Ahmed Benmansour and Abdeldjelil Amara Zenati, *Corrosion of API 5L X60 Pipeline Steel in Soil and Surface Defects Detection by Ultrasonic Analysis*, *Metals* 2024, 14, 388.

<https://doi.org/10.3390/met14040388>

Communications:

- Benkhedda Fatima, X60 Steel pipeline and aluminum characterization by TOFD Ultrasound detection, First Workshop on materials characterization by ultrasound analysis, March 7th 2016, CUTAM University of Tamanrasset – Algeria, Oral session

- Fatima .Benkhedda and Abderrahim Benmoussat, X60 steel welded joints and pitting corrosion by C-scan ultrasound method” International conference on functional materials, ICFM-2017, Hammamet (Tunisia) September,05-08 2017

-] F.Benkhedda, and A Benmoussat “study on the treatment processes of corroded pipelines tubes API 5lx60 steel ”the5th International colloquium corrosion Material’s protection CMP’18,Monastir–Tunisia, 28 November – 01 December, 2018

- F.Benkhedda, and A Benmoussat “Vibratory study of Gear transmissions” the 4thInternational conference on advances in mechanical engineering, ICAME 2018, Istanbul – Turkey, December 19-21, 2018

- F.Benkhedda, and A Benmoussat , Defect Detection of X60 Steel Hydrocarbon Pipeline , 5th International conference on advances in mechanical engineering, ICAME 2018, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey , December 17-19, 2019

-F. Benkhedda A. Benmoussat , and S. Benmansour,Tofd Ultrasonic Detection of Corrosion Surface Defects and welding surface defect in X60 Gas Pipeline Steel, 3th International Conference Tribology, 17-19 December 2020, TURKEYTRIB 2020, <http://www.turkeytribconference.com/index.php/en/>

Article

Corrosion of API 5L X60 Pipeline Steel in Soil and Surface Defects Detection by Ultrasonic Analysis

Fatima Benkhedda ¹, Ismail Bensaid ², Abderrahim Benmoussat ^{1,*}, Sid Ahmed Benmansour ¹ and Abdeldjelil Amara Zenati ¹

- ¹ Materials Research Team, LAEPO Research Laboratory, University of Tlemcen, Tlemcen 13000, Algeria; zohra200911@live.com (F.B.); benmansa@yahoo.fr (S.A.Z.); x_aman2000@yahoo.fr (A.A.Z.)
² Materials Research and Structure Laboratory, University of Tlemcen, Tlemcen 13000, Algeria; bensaidismail@yahoo.fr
 * Correspondence: abbenmoussat@gmail.com

Abstract: The corrosion steels phenomenon is one of the main problems in the oil industry, such as in buried transmission pipelines used for high gas pressure for long distances. Steels are protected from the external soil corrosion through a bituminous coating, whose action is coupled with a cathodic protection system, which aims to maintain steel in its protection field and thus to avoid any corrosion risk. However, steels in service may experience external surface defects like corrosion pitting and cracking due to electrochemical or mechanical interactions of bare steel with an aggressive soil solution after steel protection failure. These are concerning phenomena and are the major threats of the pipeline transmission system's reliability and ecological safety. Corrosion mechanisms are varied and can be evaluated by different methods, such as electrochemical measurements, which are influenced by various factors like temperature, pH, soil characteristics, resistivity, water content, and as well mechanical stresses. Corrosion results from simulated artificial soil solutions showed that steel is sensitive to corrosion by soil. Surface defects detection was carried out using an ultrasonic non-destructive method such as C-Scan Emission testing and the time of flight diffraction technique (TOFD) ultrasonic non-contact testing method. After propagation of the ultrasonic waves, the diffracted ultrasonic reflected wave occurring at the edges of the defects appears due to the presence of a corrosion defect by generating defect echoes. The C-Scan ultrasonic image shows surface reflection, including corrosion defects on interfaces with varying acoustic impedances. The cross-transverse speed ultrasonic propagation through the plate including defect is modified, revealing more surface defects, and cross-transverse speed is shown to increase ultrasonic detection presents some advantages, such as precision and speed of detection without alteration to the structure. This method can be used in the industrial context as an intelligent industrial robotics technique.

Keywords: X60 steel; surface defect; corrosion pits; weld effect; soil corrosion; ultrasonic analysis; C-scan; TOFD



Citation: Benkhedda, F.; Bensaid, I.; Benmoussat, A.; Benmansour, S.A.; Amara Zenati, A. Corrosion of API 5L X60 Pipeline Steel in Soil and Surface Defects Detection by Ultrasonic Analysis. *Metals* 2021, 11, 398. <https://doi.org/10.3390/met11020398>

Academic Editor: Sandeep Mishra

Received: 16 February 2021

Revised: 18 March 2021

Accepted: 19 March 2021

Published: 26 March 2021



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

API 5L X60 steel tubes are used for gas transmission under pressure in pipeline due to their adequate mechanical properties and corrosion resistance. The steel is produced using a controlled factory cooling-based metallurgical scheme (TMCP—thermo mechanical controlled process) [1] by refining the ferritic grain size, increasing the yield strength and toughness achieved by various hardening mechanisms based on dislocation movement. The chemical composition and mechanical characteristics must meet the specified requirements and acceptance criteria according to API standards [2]. The chemical composition is

Annexe B

Méthode de contrôle en ligne par outil intelligent

Le principe de contrôle par outil intelligent consiste à mesurer l'épaisseur à l'aide d'une technique se basant sur la méthode d'impulsions et de réflexion d'une onde ultrasonique. L'outil contient plusieurs sondes ultrasonores réparties uniformément de façon à contrôler la totalité de la circonférence du tube. Chaque sonde fonctionne en immersion dans le fluide suivant la méthode Pulse Echo.

La méthode de mesure repose sur l'écart entre la réflexion des ultrasons renvoyés par la paroi interne de la conduite (écho d'entrée) et celle de l'écho renvoyé par la paroi externe (écho de paroi extérieure).

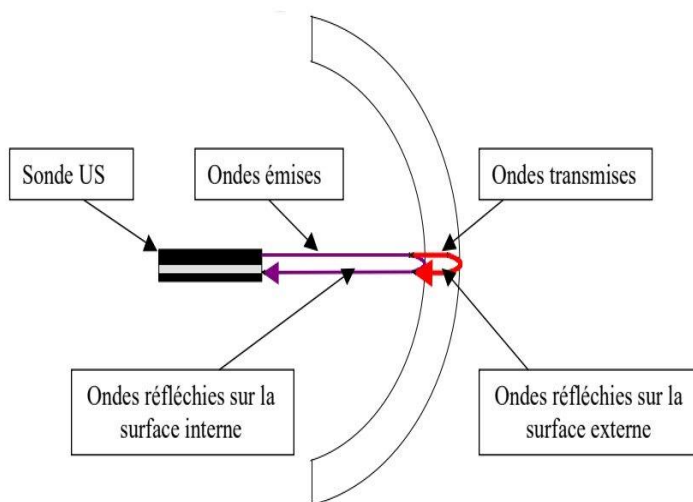


Figure 28 : Principe du contrôle du pipeline par outil intelligent à ultrason



Figure 29 : Outil intelligent type "MagneScan HR" pour le contrôle par ultrasons des pipelines. (Group limited Canada"-PII. 2004.)