



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE
ET D'INGENIERIE - ANNABA -

(Ex ENSMM)



DEPARTEMENT SCIENCE ET GENIE DES MATERIAUX

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE

DE L'OBTENTION

DE MASTER

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUES

FILIÈRE : MÉTALLURGIE

SPÉCIALITÉ : INGÉNIERIE DES SURFACES

Intitulé :

Contrôle de la qualité d'adhérence de revêtement tri couche sur pipeline d'un acier X42

Présenté par

BOULEKHIOU Khouloud

Encadrant : BELHANI Mehdi

Grade : MCA

Établissement d'affiliation :
ENSTI

Président : RETIMA
Mouhamed

Grade : Professeur

Établissement d'affiliation :
ENSTI

Examineur : BENDJEDDOU
Louiza

Grade : MCB

Établissement d'affiliation :
ENSTI

Année / 2023



Département Science et Génie des Matériaux

AUTORISATION DE DEPOT FINAL DU
MEMOIRE DE MASTER

Je soussigné (e) M. Pr. RETINA Mohamed
Président(e) du jury de soutenance de mémoire de Master, déclare avoir autorisé
Mlle Boulekhrout Khoboud
à déposer son mémoire de Master après avoir apporté les corrections signalées
par les membres du jury.

Avis du Promoteur :

Avis favorable

23/07/2023

Dr. Mehdi Belhani

Avis de l'Examineur :

avis favorable

Dr. BENDJEDDOU Louiza

Président du Jury

Dédicace

Je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers

A MES TRES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le très haut, vous accorder la santé et le bonheur « vous êtes la lumière qui illumine ma vie , vous êtes le symbole de la générosité, de la tendresse, de l'amour inconditionnel »

A MES TRES CHERS FRERES ET MA PRINCESSE SŒUR

Merci pour vos encouragements et votre soutien, que ALLAH vous garde, je vous souhaite tout le bonheur et le plus grand succès du monde

Je vous aime

Remerciements

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer le mémoire

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Dr. BELHANI mehdi**, je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant ma préparation de ce petit mémoire.

Je tiens à remercier **Dr. RETIMA Mohamed** le président du jury et **Dr. BENDJEDDOU Louiza** pour avoir examiné le présent document, et d'avoir accepté de juger et de porter leurs suggestions sur ce modeste travail.

Je exprime mon gratitude à l'équipe de laboratoire de PE au sein à l'entreprise ALTUMET à la généreuse Mme BEKHTI Djamila qu'elle a donné une autonomie précieuse pour la réalisation de ce modeste travail et aussi **M.BOUCHAMA Youcef**, **M.TAZAIRT Amine** et **FOUCHAL Abd Ennour**

J' adressons ainsi mon profonds remerciements à tous les enseignants de l'école.

Résumé

Dans le cadre de cette étude, l'objectif principal est de maîtriser les processus de préparation de surface des pipelines afin de contrôler la qualité de l'adhérence sur les pipelines revêtus au sein de la société ALTUMET - Reghaia -. Les pipelines sont constitués de tubes en acier X42 qui sont revêtus d'un revêtement tri-couche, composé d'époxy, d'adhésif et de polyéthylène à haute densité. Ce revêtement joue un rôle essentiel dans la protection des tubes contre la corrosion et les conditions extérieures.

Ce processus de préparation de surface comprend plusieurs essais sur les pipelines en acier revêtus. Tout d'abord, on réalise un essai de décollement cathodique. Ensuite, on effectue un essai d'immersion dans l'eau chaude. Enfin, on procède à un essai de résistance à l'arrachement du revêtement.

Mots-clés : pipeline, contrôle la qualité , l'adhérence, tri-couche ,corrosion ,acier revêtu

Abstract:

The main aim of this study is to control the pipeline surface preparation processes in order to monitor the quality of adhesion on pipelines coated at ALTUMET - Reghaia. The pipelines are made up of X42 steel pipes coated with a three-layer coating composed of epoxy, adhesive and high-density polyethylene. This coating plays an essential role in protecting the pipes against corrosion and external conditions.

This surface preparation process involves several tests on coated steel pipelines. First, carry out a cathodic debonding test. Next, carry out a hot water immersion test. Finally, carried out a coating peel strength test.

Key words: pipeline, quality control, adhesion, three-layer, corrosion, coated steel

الملخص :

لهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو التحكم في عمليات التحضير السطحي لخطوط الأنابيب من أجل التحكم في جودة الالتصاق على خطوط الأنابيب المطلية داخل- ALTUMET - Reghaia خطوط الأنابيب مصنوعة من أنابيب فولاذية X42 مغلفة بطبقة ثلاثية الطبقات، تتكون من الإيبوكسي والبولي إيثيلين اللاصق وعالي الكثافة. يلعب هذا الطلاء دورًا أساسيًا في حماية الأنابيب من التآكل والظروف الخارجية.

تتضمن عملية إعداد السطح هذه عدة اختبارات على خطوط أنابيب الفولاذ المطلية. بادئ ذي بدء، القيام باختبار فصل الكاثود. ثم القيام باختبار غمر الماء الساخن. أخيرًا، إجراء اختبارًا لمقاومة تمزيق الطلاء

الكلمات المفتاحية:، خط الأنابيب، مراقبة الجودة، الالتصاق، الطبقة الثلاثية، التآكل، الفولاذ المطلي

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : synthèse bibliographique sur le revêtement de pipeline en acier.....	3
I .1. Généralités sur la corrosion des aciers.....	3
I.2. Corrosion dans les pipelines	3
I.2.1. Corrosion des aciers par les sols	4
I.2.2. Corrosion en milieu marin	4
I.2.3. Corrosion en milieu acide	5
I.3. Revêtement de pipe en acier	5
I.3.1. Processus de revêtement extérieur sur les pipelines	5
I.3.1.1. Présentation de surface d'acier	5
I .3.1.2. Application de la couche primaire	7
I .3.1.3. Application de couche secondaire.....	8
I .3.1.4. Application de la couche tertiaire	8
I .3.1.5. Contrôle sur ligne de fabrication.....	9
I.4. Propriété tribologique	10
I.4.1 principe théorique de l'adhésion des matériau Usure	11
Chapitre II : Matériaux étudiés et techniques expérimentales	14
II.1. L'objectif	14
II.2. Matériaux étudiés	14
II.2. 1.Revetement	14
II.2. 2. Acier pipeline	16
II.3. Essais effectués au laboratoire contrôle.....	17
II.3.1. Description des principaux essais.....	17
II.3.1.1. Essai de découlement cathodique selon la norme ISO 21809	17
II.3.1.2. Essai d d'immersion dans l'eau chaude selon la norme ISO 21809.....	19
II.3.1.3. Essai de la résistance à l'arrachement du revêtement selon la norme ISO 21809	20
Chapitre III : Résultats et discussions	23
III.1. Résultat de l'essai de décollement cathodique du revêtement extérieure:	23
III.1.1.Interprétation des résultats.....	23
III.2. Résultat de l'essai d'immersion dans l'eau chaude du revêtement extérieure	24
III.2.1. Interprétation des résultats.....	24
III.3. Résultat de l' essai du la résistance à l'arrachement du revêtement	24
III.3.1. Interprétation des résultats.....	25

Conclusion Générale	26
---------------------------	----

Liste des figures

Fig. I. 1: Corrosion dans les pipelines	3
Fig. I. 2: Processus de revêtement extérieur	5
Fig. I. 3: Pipeline avant le Grenailage	6
Fig. I. 4: Pipeline apres le Grenailage	6
Fig. I. 5: Application de l'epoxy	8
Fig I. 6: Application de PE	9
Fig. I. 7: Détecteur électrique	10
Fig. I. 8: Schéma représentatifs	11
Fig.I. 9: Schéma de l'usure adhésive.....	11
Fig. II. 1 : Perçage du défaut artificiel.....	18
Fig. II. 2: Les équipements d'essai d'écoulement cathodique.....	19
Fig.II. 3: Verrerie avec couvercle en verre.....	19
Figure II. 4: Verrerie avec couvercle en verre	19
Fig.II. 5: L'arrachement de PE.....	21
Fig.III. 1: Les six rayons décollés.	23

Liste des tableaux

Tab. II. 1: Les caractères de tri-couche.	16
Tab. II. 2: Composition chimique de l'acier X42.....	16
Tab. II. 3: Les propriétés mécaniques de l'acier X42.	16
Tab.III. 1: Résultat de décollement cathodique.	23
Tab.III. 2: Résultat d'immersion dans l'eau chaude du revêtement.	24
Tab.III. 3: Les vitesses de l'essai de la résistance à l'arrachement du revêtement.....	24

Table des Abréviations et Symboles

Abréviations, Symboles	Désignation
PE	Polyéthylène
ISO	International Organization for Standardization
PEHD	polyéthylène à haute densité
Rm	Résistance à la rupture
D	Dureté Shore
A%	Allongement à la rupture
F	Force d'arrachement
Tf	Température de fusion
Tb	Température de fragilité
ρ	Masse volumique
Ep	Epaisseur normale du film réticulé
API	Institut Américain du Pétrole
PSL2	Steel pipe manufacture
HSLA	Haigh Strength low-alloy Steel

Introduction générale

Les demandes énergétiques mondiales ne cessent de s'accroître, avec le développement très rapide de l'économie mondiale. Le transport du pétrole et du gaz avec canalisation reste le moyen le plus économique et le plus sûr pour les sociétés de transport d'hydrocarbure. Pour augmenter la rentabilité d'un oléoduc et la durée de vie, il est nécessaire de maîtriser le processus de revêtement des tubes par la mise en place des procédures de contrôle qualité et choisir les points de contrôle et les caractéristiques à contrôler pour garantir la durabilité et s'assurer de la conformité des résultats. [1]

Pour cela, on a procédé dans le premier chapitre par une synthèse bibliographique sur la généralité de corrosion avec une description du processus de revêtement et nous avons présenté le phénomène de l'adhérence

Dans le deuxième chapitre est organisé en deux parties : dans la première, on présente les tri-couches et l'autre partie contient les descriptions de l'essai qui ont été effectués au niveau du laboratoire PE.

Et pour le dernier chapitre, présente la discussion des résultats trouvés, et enfin une conclusion et des annexes

Chapitre I : synthèse bibliographique sur le revêtement de pipeline en acier

Chapitre I : synthèse bibliographique sur le revêtement de pipeline en acier

I.1. Généralités sur la corrosion des aciers

La corrosion est définie selon la Norme ISO 8044 : « Interactions physicochimiques entre le métal et son environnement variation et souvent dégradation des propriétés du métal la fonction du métal lui-même, son environnement ou un système technique est composé de ces deux éléments » [2]. Pour cela la corrosion des aciers est un Phénomène naturel et courant, la transformation des molécules de fer en diverses formes à Hydroxyde ferreux après la surface extérieure du film d'oxyde est exposée à L'oxygène dissous plus l'air passe de l'hydroxyde ferreux à l'hydroxyde ferrique hydraté orange . [3]

I.2. Corrosion dans les pipelines

La corrosion des pipelines est une dégradation et destruction naturelles des matériaux et des propriétés de base des pipelines en raison de réactions électrochimiques et autres entre le matériau du pipeline et son environnement, y compris les surfaces internes et externes. Comme toute autre catastrophe naturelle, la corrosion des pipelines peut entraîner des défaillances potentiellement mortelles et des dommages coûteux aux pipelines et aux systèmes connexes. La recherche sur la corrosion des pipelines se concentre sur les objectifs suivants : Prévenir les pannes potentiellement mortelles ,mesurer le processus de dégradation. Comprendre et contrôler les causes de la dégradation des matériaux des canalisations. Prendre des mesures correctives pour éviter une détérioration supplémentaire

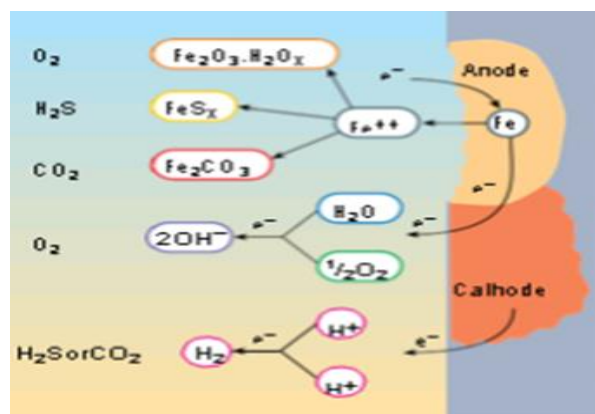


Fig. I. 1:Corrosion dans les pipelines[4]

Il existe deux formes de corrosion ; corrosion généralisée (uniforme) et corrosion localisée

- Corrosion généralisée : c'est le mode de corrosion le plus commun et leur attaque uniforme sur toute la surface avec une perte de métal importante mais sans grandes résultats
- Corrosion localisée : il trouve plusieurs types de corrosion localisée sont : la corrosion sous contrainte, la corrosion cavernueuse, la corrosion par piquûre, la corrosion galvanique, la corrosion inter granulaire et la corrosion érosion.

I.2.1. Corrosion des aciers par les sols

Le sol environnant est l'un des indicateurs du risque de corrosion à l'extérieur de la canalisation métal enfoui. Elle dépend non seulement de ses propriétés minéralogiques, mais aussi de sa Teneur en humidité, pH, composition chimique, résistivité et perméabilité à l'air. le sol peut être considéré comme un système poreux hétérogène Avec des propriétés colloïdales, les espaces entre les particules de sol peuvent être comblés eau ou gaz. La corrosivité du sol est considérée comme la capacité du milieu Création et développement de phénomènes de corrosion. Le sol est défini comme un électrolyte Ceci peut être compris par la théorie électrochimique. Les paramètres caractéristiques du sol jouent également un rôle important Type et évolution de la corrosion, c'est-à-dire profondeur d'enfouissement, température, Gravité spécifique apparente, taille des particules, composition minérale, capacité rétention d'eau, porosité.

Le niveau d'humidité joue un rôle important dans le processus de corrosion par son influence sur le processus de corrosion Aération du sol et résistivité du sol. Index général que nous pouvons déterminer Le degré d'aération des sols corrosifs à l'aide de cartes détaillées est indiqué par le potentiel redox. Faible potentiel redox Caractérisation des conditions favorables à la corrosion bactérienne [5]

I.2.2. Corrosion en milieu marin

Les mécanismes de la corrosion marine résultent de l'ensemble des interactions physico-chimiques et mécaniques entre les matériaux et l'environnement particulier du milieu marin. La conductivité élevée de l'eau de mer favorise le couplage galvanique et la corrosion des pieux. Sa forte teneur en chlorure le rend agressif pour les métaux passivables, notamment certains aciers inoxydables. L'eau de mer est biologiquement active et peut également induire des phénomènes de corrosion influencés par les bactéries [6]

On y a distingue les facteurs de corrosion de cette millieu suivants :

- 1 - physiques : - vitesse des courants - température - pression
- 2 - chimiques : - salinité - oxygène - pH - gaz carbonique

3 - biologiques : - salissures biologiques

I.2.3. Corrosion en milieu acide

La solution acide est généralement utilisée pour le décapage, le nettoyage Acides industriels, décalaminage acide, acidification pétrolière... Généralement nous l'utilisation de fortes concentrations d'acide entre 5% et 28% en poids rend l'environnement Très corrosif pour l'acier à faible teneur en carbone, l'acier au carbone et l'acier faiblement allié. acide hydrochlorique, De l'acide fluorhydrique, de l'acide acétique ou de l'acide formique est injecté dans le trou pendant le traitement L'acidification irrite et cause de problèmes de corrosion[4]

I.3. Revêtement de pipe en acier

Les revêtements de protection fonctionnent pour augmenter la durée de vie et éviter les actions mécaniques et chimiques de l'environnement. Les pipes sont recouvertes par du revêtement tri couche (époxy, adhésif, polyéthylènes haute densité)

I.3.1. Processus de revêtement extérieur sur les pipelines

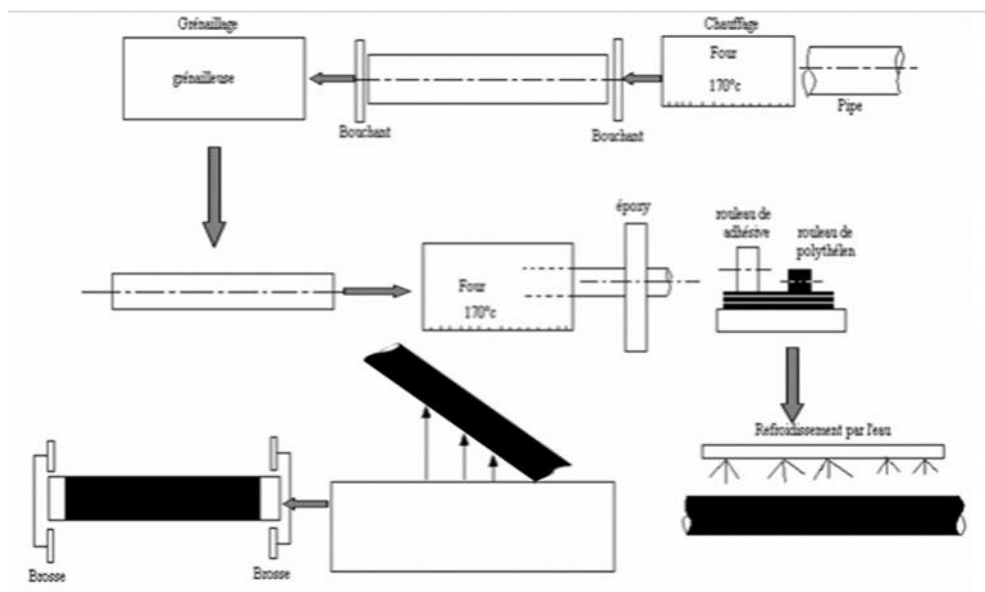


Fig. I. 2: Processus de revêtement extérieur [5].

I.3.1.1. Présentation de surface d'acier

- **Nettoyage et séchage**

En mettant des solvants, des diluants pour éliminer les huiles sur la pipe ce dernier est séché à $T=170^{\circ}\text{C}$.

- **Grenaillage extérieur**

La qualité du grenaillage doit être conforme au degré de soin stipulé dans le contrat. Quel que soit le degré de propreté choisi, un grenaillage régulier doit être appliqué sur toute la surface de la pipe. Lors du grenaillage, l'écart entre les tubes est critique pour ne pas endommager le chanfrein. Il est parfois nécessaire d'isoler l'extrémité du tube pour éviter que des projectiles ne restent à l'intérieur du tube. Les verres doivent être propres, recyclables et dépoussiérés en permanence. De nouveaux plans devaient être ajoutés quotidiennement pour obtenir des mélanges réguliers, des grands et des petits coins et des éléments circulaires. La rugosité résultante ne doit pas être inférieure à 40 micromètres. Le tube grenaillé doit être protégé. Si après préparation de la surface du tube à revêtir, il est contaminé ou recouvert de rouille, le tube doit être partiellement ou totalement grenaillé pour appliquer notre revêtement.

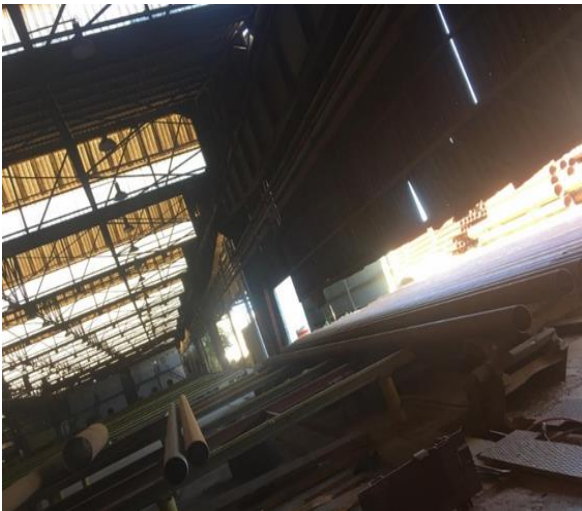


Fig. I. 3: Pipeline avant le Grenaillage



Fig. I. 4: Pipeline après le Grenaillage

Les contrôles à effectuer lors du grenaillage sont :

- Contrôle visuel des chanfreins.
- Contrôle visuel du degré de propreté,
- Contrôle visuel de la grenaillage (poussière, granulométrie),
- Test de rugosité,
- Contrôle visuel de la différence de pression d'air (entre côté propre et côté poussière), [7]
- La contamination saline mesure par contrôleur portable que contrôle la NaCl et ce dernier ne dépasse pas 20%



Fig. I.5: Test de rugosité



Fig. I. 6 : Appareillage de contrôle la contamination saline

I .3.1.2. Application de la couche primaire

- **Préchauffages des tubes**

On chauffe notre tube à température de 170°C jusqu'aux 200°C et il doit y avoir une régularité dans toute la section de pipeline on chauffe pour les tri-couche qui sont bien adhérentes

- **Application de l'époxy**

Les revêtements époxy se composent de deux parties : la résine (poudre) et le durcisseur. La résine est généralement de couleur rouge tandis que le durcisseur est plus foncé. Cette sorte de revêtements sont connus pour leur durabilité, leur solidité et leur résistance chimique. Les résines époxy sont des oligomères réactifs [2]



Fig. I. 5:Application de l'epoxy

I .3.1.3. Application de couche secondaire

- **Applications de l'adhésif**

C'est la couche intermédiaire qui doit être appliqué sur une surface aussi propre que possible. Le film doit être exempt de toute contamination, continu et régulier en température, taille et coloration. L'uniformité dans l'application se traduira par l'uniformité des résultats de collage. Avant utilisation, les gommages Borealis doivent être conservées entre 20 et 25°C pour les rendre malléables et pouvoir les mettre facilement dans l'extrudeur. En ce qui concerne la colle sous forme de granulés, il est important de protéger les granulés de toute contamination ou humidité. Pour cette raison, ils doivent être stockés avec un soin particulier. Les opérations de contrôle à effectuer à ce stade sont celles préconisées par le fournisseur de colle, telles que : [7] Contrôles visuels de l'application du film (extrusion latérale),

- Prise de la température avant démarrage et lors des arrêts,
- Contrôle de la vitesse de rotation de l'extrusion
- Contrôles des indicateurs de température des corps de chauffe,

I .3.1.4. Application de la couche tertiaire

- **Application de polyéthylène**

Comme l'adhésif, le film PE doit être régulier et exempt de contamination afin d'obtenir un revêtement uniforme. Le polyéthylène extrudé est pré-déposé sur le pipe, ce qui donne un revêtement uniforme et dense sans zones lâches, vides ou effets de toit. Après cette application, assurez-vous que l'extrémité du tube n'est pas endommagée. Les revêtements d'usine sont appliqués conformément aux procédures établies et approuvées. Le temps pendant lequel le tuyau est maintenu à une certaine température ne doit pas conduire à une

oxydation de sa surface, préjudiciable à la bonne qualité et à la résistance du revêtement aux choc et résister les variation de température. [7]

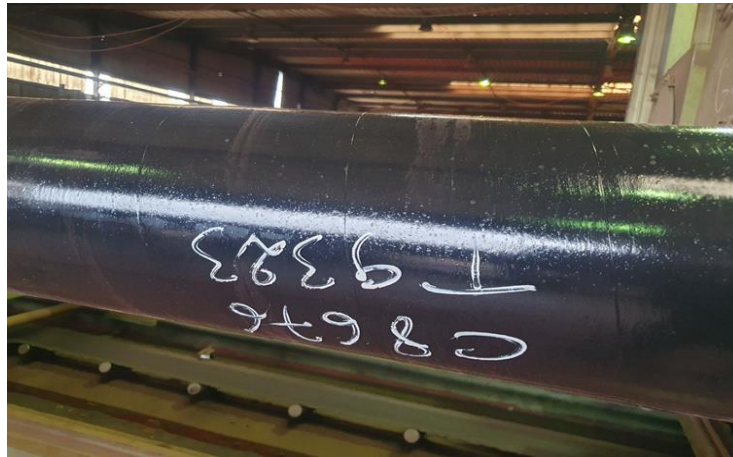


Fig I. 6:Application de PE

- **Refroidissement**

On doit refroidir le tube revêtu progressivement avec l'eau. Un exotherme se produit. La chaleur stockée dans le tube en acier chauffe la gaine en polyéthylène. Cet échauffement est proportionnel à l'épaisseur de l'acier. Les opérations de contrôle effectuées par le personnel du service de contrôle sont les suivantes : . [7]

- Mesurer la température de l'eau car le refroidissement à l'eau froid peut créer des poches d'air qui fragilisent l'adhérence
- Mesurer la température du PE à l'extrémité et au milieu du pipeline

I .3.1.5. Contrôle sur ligne de fabrication

- **Détecteur de non porosité électrique**

Cette étape de contrôle sur ligne de production consiste à détecter la présence de porosité du revêtement à l'aide d'un balai électrique alimenté en haute tension de 25 KV. Lorsqu'une fuite est détectée par une étincelle se produisant entre l'acier et l'électrode et un signal sonore apparaît, l'opérateur doit alors : repérer la fuite, matérialiser cet emplacement par un repère bien visible, et signaler le tube au contrôleur sur le tableau pour qu'il apparaisse sur le rapport de production. Les opérations de contrôle à effectuer sont :

- Vérifier le contact de la couronne et du revêtement.
- Mesurer la tension de l'appareil, [7]

- Envoyer le tube non-conforme à la réparation.



Fig. I. 7: Détecteur électrique

C'est un contrôle très important du processus de fabrication. Il a la fonction d'un régulateur, au moyen duquel il est possible d'accélérer ou de ralentir le rythme de production de la machine. Il a également un rôle préventif, il prévient et informe le personnel de production de toutes ses observations en attribuant à chaque tube l'un des noms suivants : accepter, réparer, stocker. De même, il occupe un poste administratif et est responsable de la rédaction d'un rapport pour chaque tuyau produit. Les opérations de contrôle à effectuer sont :

- Mesurer l'épaisseur du revêtement sur toute la surface des tubes.
- Trouver les valeurs minimales et maximales : en début de poste, faire un maximum de mesures, pendant le poste, au moins 5 mesures, - inspection visuelle générale pour identifier les moindres défauts,
- Contrôle des extrémités, principalement des soudures,. [7]
- Marquage à la peinture des tubes conformes (N° tube, Référence de la norme, diamètre et épaisseur)
- Validation des résultats par un enregistrement sur fiche de contrôle.

I.4. Propriété tribologique

La tribologie est la science et la technologie qui traitent de l'interaction des surfaces en mouvement relatif. Par conséquent, cette science comprend l'étude du frottement, de l'usure. Lubrification des surfaces en contact avec des pressions basses et élevées, et leur interaction sur l'interface. Ces interactions peuvent transmettre la conversion de la force, de l'énergie mécanique et des propriétés chimiques de la surface en problèmes ou phénomènes induits par leur forme et leur topographie. [8].

I.4.1 principe théorique de l'adhésion des matériau Usure

L'usure peut résulter d'un glissement (frottement) ou d'un contact roulant entre deux surfaces solides, ou de l'écoulement d'une surface fluide chargée de particules solides (érosion). Dans le premier cas, on distingue généralement l'usure abrasive (deux corps ou trois corps) et l'usure adhésive [9].

a. Usure abrasive

L'usure abrasive est un phénomène mécanique d'enlèvement de matière provoqué par des particules dures glissant ou roulant sur une surface sous pression extérieure. [9]. Il existe deux processus différents de ce phénomène : l'usure abrasive à deux corps et l'usure abrasive à trois corps comme le montre la figure I.3.a. En effet, au cours de leur mouvement, si les particules fortement ancrées à la surface d'un matériau pénètrent la surface d'un autre matériau, on parle de l'usure abrasive à deux corps ; Si ces particules sont libres de glisser entre les deux surfaces, on parle donc de l'usure abrasive à trois corps. [9].

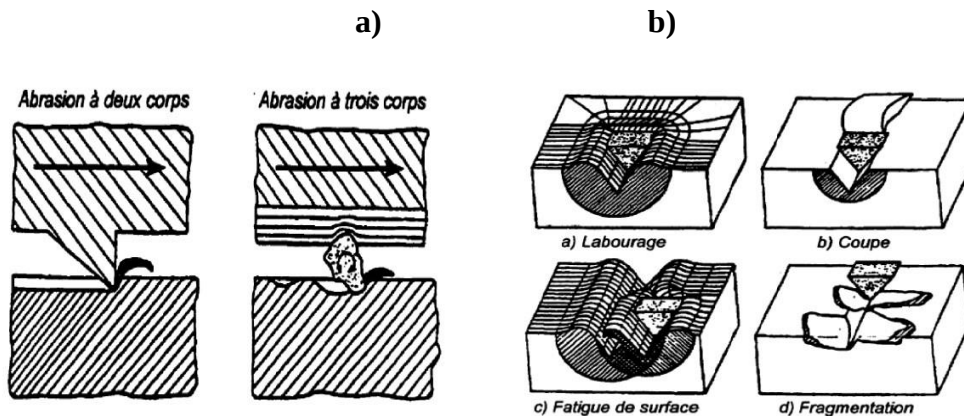
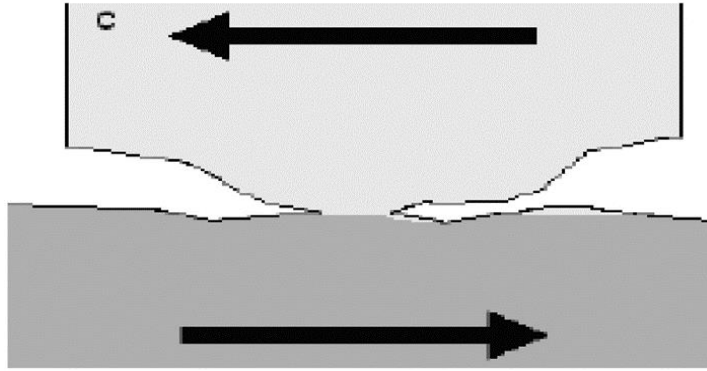


Fig. I. 8: Schéma représentatifs

b. L'usure adhésive

Deux surfaces, en mouvement relatif, ne font que loucher sur la rugosité. Lorsque nous Force normale appliquée F , la zone de contact subit une déformation plastique, formant une micro-soudure qui appelée collage [8]



C . L'usure par oxydation

Il se produit en présence d'oxygène lorsque le frottement provoque Echauffement important des contacts. Croissance accélérée à haute température couche d'oxyde. Lorsque ceux-ci atteignent une épaisseur critique, des frottements se produisent. Séparé par cisaillement, forme alors une nouvelle couche d'oxyde en surface surfaces nues et plus encore. Par conséquent, l'usure oxydative est une élimination Mécanique des matériaux oxydants. [8]

Chapitre II: Matériaux étudiés et techniques expérimentales

Chapitre II : Matériaux étudiés et techniques expérimentales

II.1. L'objectif

L'objectif de ce travail est de contrôler la performance de processus de revêtement extérieur tri couche appliqué sur les tubes pipelines en acier en effectuant des essais de contrôle de l'adhérence.

II.2. Matériaux étudiés

II.2. 1.Revetement

Notre étude repose sur les essais d'adhérence pour contrôler les tri couche de revêtement extérieure tel que

- couche primaire époxy poudre
- couche secondaire : adhésif copolymère
- couche tertiaire : polyéthylène extrudé (PEHD)

Ces trois couches offre une protection anticorrosion efficace et durable aux tubes pipelines et lui donne une bonne résistance aux contraintes environnementaux, les caractéristiques de revêtement sont :

- Très grande inertie chimique.
- Combinaison des propriétés de l'époxy avec les qualités du polyéthylène.
- Excellente adhérence du revêtement au corps en acier
- Rigidité diélectrique élevée. [3]

Les propriétés de de tri-couche(l'adhésif polyéthylène, poudre époxydique et PEHD:

Produits	Caractéristiques	Critère d'acceptation	Contrôleur documentaire (Responsabilité)	Type de Rapport (Réf. FO)
Adhésif Polyéthylène	Masse volumique	=0,934	Service Contrôle	Imprimé fournisseur
	Indice de fluidité	= 1,3 g/10 mn	Service Contrôle	
	Résistance à la rupture	Rm = 180 kg/ cm ²	Service Contrôle	
	Dureté Shore D	D = 47	Service Contrôle	
	Allongement à la rupture	A ≥ 700 %	Service Contrôle	

	Force d'arrachement	F > 200 N/cm à T = +23°C F > 30 N/cm à T = +70°C	Service Contrôle	Fiche technique produit
	Température de ramollissement	Tc = 94 °C	Service Contrôle	
	Température de fusion	Tf = 126 °C	Service Contrôle	
	Température de fragilité	Tb < -80 °C	Service Contrôle	
	Température de mise en œuvre	T = 180°C	Service Contrôle	
Poudre Epoxydique Thermo – durcissable	Masse volumique	$\rho = 1,5 \text{ g/ml}$	Service Contrôle	Imprimé fournisseur
	Granulométrie	$\varnothing_m = 40 \pm 5 \mu\text{m}$	Service Contrôle	Fiche Technique
	Teneur en humidité	$\leq 0,50 \%$	Service Contrôle	
	Epaisseur normale du film réticulé	$70 \leq E_p \leq 200 \mu\text{m}$	Service Contrôle	
	Température de transition vitreuse	$T_g = 110 \pm 5^\circ\text{C}$	Service Contrôle	
	Temps de Gel	$45 \leq R \leq 60 \text{ sec}$	Service Contrôle	
	Rendement Théorique	$3,38 \leq R \leq 9,65 \text{ m}^2 / \text{kg}$	Service Contrôle	
	Température de fusion	Tf = 240°C	Service Contrôle	
	Température de mise en œuvre	T = 110°C $\pm$ 5°C	Service Contrôle	
	Couleur du film	Rouge	Service Contrôle	
	Aspect du film	Satiné	Service Contrôle	
Polyéthylène Haute Densité PEHD Thermo – plastique	Masse volumique	$\rho = 1,5 \text{ g/ml}$	Service Contrôle	Imprimé fournisseur
	Température de fusion	Tf = 240°C	Service Contrôle	Fiche Technique
	Température de transition vitreuse	Tg = 110 °C	Service Contrôle	
	Température de fusion	Tf = 240°C	Service Contrôle	
	Température de transition vitreuse	Tg = 110 $\pm$ 5°C	Service Contrôle	
	pression	P = 0.15- 0.5 MPa	Service Contrôle	
	densité	9,60-9,70 kg/m ³	Service Contrôle	
	Couleur du film	noire	Service Contrôle	

	Température de mise en œuvre	$T = 110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	Service Contrôle	
--	------------------------------	---	------------------	--

Tab. II. 1: Les caractères de tri-couche. [7]

II.2. 2. Acier pipeline

Parmi les exigences de spécification auxquelles l'acier pour pipelines doit répondre, il y a la Vérification de la propriété d'emploi : limite d'élasticité maximale, bonne ténacité, ainsi qu'une bonne soudabilité, une bonne résistance à la corrosion et un faible coût. Les retours, afin de répondre à ces exigences, sont connus sous le nom de (HSLA) (High Strength low-alloy Steel) a été développé au cours des quarante dernières années. 95% de l'acier est utilisé. L'acier micro-allié à haute résistance (HSLA) est utilisé pour les tuyaux. Aciers à haute résistance, X42 à X65, avec peu de différence de prix à la tonne, D'où des économies de métal très importantes. Les spécifications américaines API et 5L PSL2 stipulent l'épaisseur standard de chaque diamètre et sa tolérance de fabrication. Parce que notre grade est X42 (219x7.90mm)[10]

A. Composition chimique en % pour L' API 5L X42 PSL2 [11]

TYPE	Grade d'acier	C .	Si	Mn .	P	S	Ti
API 5L X42 PSL2	X42	$\leq 0,24$	$\leq 0,04$	$\leq 1,30$	$\leq 0,025$	$\leq 0,015$	$\leq 0,04$

Tab. II. 2:Composition chimique de l'acier X42

B. Les propriétés mécaniques pour L'API 5L X42 PSL2 [11]

TYPE	Grade	Résistance à la traction (Mpa)	Limite d'élasticité (Mpa)	allongement
API 5L X42 PSL2	X42	≥ 415	≥ 290	$\geq 21\%$

Tab. II. 3: Les propriétés mécaniques de l'acier X42.

- API : Institut Américain du Pétrole.
- 5L : Spécification pour le pipeline.

- X : Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance. Le chiffre après le "X" correspond à la valeur de la limite d'élasticité minimale. Dans notre cas X42 a une limite d'élasticité minimale de 42ksi (415MPa).

II.3. Essais effectués au laboratoire contrôle

II.3.1. Description des principaux essais

Le but des tests d'adhérence est de générer une défaillance du revêtement. L'adhérence du revêtement est un indicateur de la qualité de la préparation de surface et de l'adhérence du revêtement à la surface et/ou aux revêtements supplémentaires. Les essais d'adhérence fournissent une méthode quantifiable pour déterminer si un système de peinture ou de revêtement est adapté à l'usage prévu et prêt à répondre aux exigences de qualité du cahier des charges ou exigences clients.

II.3.1.1. Essai de découlement cathodique selon la norme ISO 21809

Ce test consiste à évaluer la résistance au pelage des revêtements endommagés, Exposition à la polarisation cathodique. Les tests doivent être effectués sur des spécimens retirés Dans les composants préalablement revêtus testés pour la porosité, où Des imperfections artificielles de dimensions définies ont été percées. Des tests peuvent être effectués sur des composants revêtus

L'équipement :

Potentiostat,. Équipement de chauffage dont la température peut être contrôlée à 3 °C près (four). Électrode de référence.

Anode (contre-électrode), par exemple fil en platine de 0,8 mm à 1,0 mm de diamètre nominal, Récipient d'essai, c'est-à-dire cylindre en plastique ou en verre, de 75 à 100 mm de diamètre intérieur Couvercle en plastique avec des entrées pour référence et des contre-électrodes.

Solution de chlorure de sodium, 3 % en masse dans de l'eau ou distillée (électrolyte).

Matériau pour assurer l'étanchéité de la cellule d'essai (produit d'étanchéité). Dispositif de mesure de la température, exactitude 1 °C (thermocouple). Couteau. Et foret conique de Ø6 mm. [12]

- **Mode Opérateur**

L'échantillon prélevé sur l'anneau de test doit être d'environ 100 mm x 100 mm x épaisseur du tube.

- Les défauts de 6 mm de diamètre doivent percer le revêtement au centre Les éprouvettes sont exposées au substrat en acier (voir Fig. II. 1).

- Le cylindre en plastique doit être centré sur le défaut et doit être enduit de mastic Utilisé pour former un joint étanche.
- Le cylindre doit être rempli avec la solution de chlorure sur une hauteur d'au moins 70 mm 3 % de sodium, préchauffé à la température d'essai.
- Le niveau de la solution doit être marqué sur le cylindre.
- L'électrode doit être insérée dans la solution et connectée à la borne positive de l'alimentation courant continu.
- La borne négative de l'alimentation doit être connectée à une zone Décoller l'éprouvette.
- Une tension doit être appliquée (négative par rapport à l'électrode de référence au calomel) en tube à essai

- 1.Foret conique Ø6 mm
- 2.Extrémité conique
- 3.Revêtement
- 4.Acier de X42

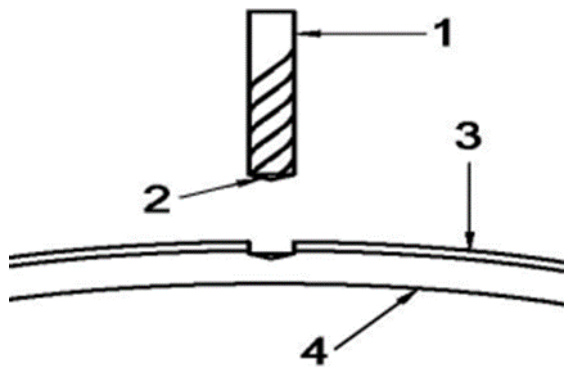


Fig. II. 1 :Perçage du défaut artificiel

- On applique 1,38 V, $\pm 0,15$ V, 23 °C + 3 °C, pendant 28 j
- Vérifier la température de l'acier avec thermocouple et enlever le revêtement sur une petite zone à l'extérieur
- refroidir l'échantillon à l'air à température ambiante
- enlever la couche de polyéthylène jusqu'à une épaisseur restante inférieure ou égale à 1 mm appropriée et réaliser 6 incisions radiales à travers la couche d'époxy
- metre une point dans le milieu couteau sous la couche d'époxy au niveau de la porosité
- enfin mesurer la perte d'adhérence dans chaque incisions[12]

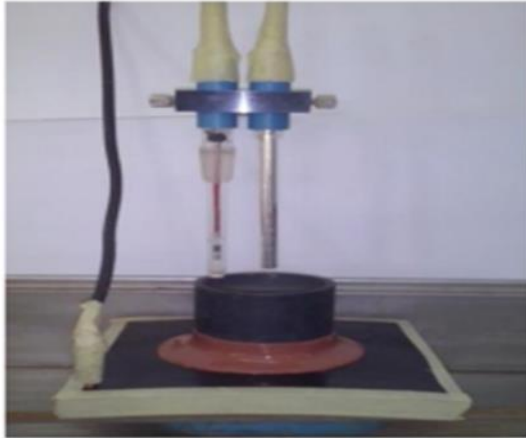


Fig. II. 2: Les équipements d'essai d'écoulement cathodique

II.3.1.2. Essai d'immersion dans l'eau chaude selon la norme ISO 21809

Les tests doivent inclure une immersion dans l'eau chaude pour évaluer la résistance électrique du revêtement PE à trois couches, appliquée en usine sur les tuyaux pour perdre l'adhérence aux substrats en acier et en environnement humide[5]

- **L'équipement :**

Four ou bain thermostatique à température de $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. + Récipient + une verrerie avec couvercle en verre + couteau [12]



Fig.II. 3: Verrerie avec couvercle en verre

- **Mode opératoire :**

Les échantillons doivent être coupés à froid sous forme élémentaire 150 mm x 100 mm, Le petit côté est dans une direction perpendiculaire à l'axe du tube.

- Les surfaces nues doivent être poncées à l'eau avec du papier abrasifs

- Le tube à essai doit être placé dans un récipient en verre rempli d'eau distillée Préchauffer à 80°C.
- S'assurer que l'échantillon est recouvert d'au moins 50 mm d'eau.
- Maintenir l'eau et la prise d'essai à 80°C pendant 48 heures.
- Après la période de conditionnement, les échantillons doivent être retirés du bain et laissés sécher à l'air moyen de papier ou de tissu.
- Les échantillons doivent être examinés après refroidissement à température ambiante.
- Inspection visuelle des échantillons pour évaluer la perte d'adhérence Interface revêtement/substrat sur les quatre faces. ignorer toute séparation Revêtement de 5 mm de chaque côté du coin de l'échantillon [12]

II.3.1.3. Essai de la résistance à l'arrachement du revêtement selon la norme ISO 21809

Les valeurs d'adhérence dépendent de la température d'essai. La température recommandée est comprise entre 15 et 25°C. Cette propriété peut être déterminée à l'aide de deux méthodes : en mesurant la vitesse d'arrachement ou en mesurant la force de l'arrachement

- **Mesure de la vitesse d'arrachement**

La méthode consiste à mesurer la vitesse moyenne d'arrachement du revêtement de son support métallique.

- **L'équipement**

Scie ou couteau, pince, masses variables, chronomètre.

- **Mode opératoire**

L'essai est effectué à une température comprise entre 15 °C et 25 °C et une humidité relative de 65 % ± 5 % ; s'il est prévu d'effectuer cet essai à une température différente, la méthode décrite doit être adaptée.

Isoler un revêtement de 50 mm de large, perpendiculaire à l'axe du tuyau.

Coupez cette bande le long du générateur.

Relâchez les bandes sur une surface suffisamment grande pour permettre la fixation de la masse.

Les tubes sont disposés et attachés aux extrémités des sangles pour libérer une masse de 40 kg. La vitesse moyenne de pelage du revêtement sur l'arc de 45° est $\leq 10\text{mm/min}$ [12]

✓ **Expression des résultats**

Mesurer l'arrachement de revêtement pour chaque 1min sur un arc de 45° aboutissant à la génératrice inférieure [12]



Fig.II. 5:L'arrachement de PE

Chapitre III : Résultats et discussions

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Résultat de l'essai de décollement cathodique du revêtement

extérieure:

- Tension de l'essai $-1,38 \text{ V}, \pm 0,15 \text{ V}$
- Température de l'essai : 23 ± 3
- Solution de chlorure de sodium : 3% Na Cl
- Diamètre de trou : 6mm
- Epaisseur de revêtement appliqué : $\leq 5 \text{ mm}$
- Durée de l'essai : 28 j

Diamètre de du trou :	Mesure des rayons décollés (mm)						Moyenne
6mm	1	2	3	4	5	6	0.33
	0	0	2	0	0	0	

Tab.III. 1: Résultat de décollement cathodique.



Fig.III. 1: Les six rayons décollés.

III.1.1. Interprétation des résultats

Le tab. III.1. Ci-dessous représente les six mesures des rayons décollés (mm) tel que la moyenne de décollée est 0.33mm et les mesures indiquent un potentiel adéquat et un

courant cathodique approprié ainsi on peut montrer que ce essai fonctionne correctement et elle conformes selon la norme ISO 21809-2018.

III.2. Résultat de l'essai d'immersion dans l'eau chaude du revêtement extérieure

- Température de l'essai : 80 ± 3
- Dimension de l'éprouvette 150mm*100mm
- La profondeur de la perte d'adhérence $\leq 2.0\text{mm}$ et maximum $\leq 3.0\text{ mm}$
- Duréé de l'essai 48h

Les faces		01	02	03	04	Résultats
Les profondeurs de découlement en (mm)	N°1	1.2	1.8	1.1	1.5	Les résultats sont acceptables et conformes aux normes
	N°2	0.9	2.0	0.4	1.2	
	N°3	1.3	1.4	0.3	1.0	
	N°4	0.7	1.3	0.8	0.9	
	Moy	1.025	1.52	1.62	1.15	

Tab.III. 2: Résultat d'immersion dans l'eau chaude du revêtement.

III.2.1. Interprétation des résultats

L'essai d'immersion dans l'eau chaude permet de simuler les conditions réelles quel le revêtement peut-être exposé (la chaleur et l'humidité) le tableau ci-dessus illustre les valeurs correspondant à la perte d'adhérence interface de revêtement/substrat sur les quatre faces

Les résultats de l'essai d'immersions dans l'eau chaude montrent une bonne adhérence selon la norme ISO 21809-1 car cet dernière exige de rester 5 mm de l'adhésif pour chaque côté du coin de l'échantillon

III.3. Résultat de l'essai de la résistance à l'arrachement du revêtement

Vitesse d'arrachement V(cm/min)	0.44	0.5	0.09	0.8	0.25
Moyenne de la vitesse	0.45				

Tab.III. 3: Les vitesses de l'essai de la résistance à l'arrachement du revêtement

III.3.1. Interprétation des résultats

D'après les résultats de Fig II. 4 et du Tab. III.3 ci-dessus illustre la variation de la vitesse d'arrachement tel que la moyenne de la vitesse d'arrachement est 0.45 cm/min et la norme exigent de ne pas dépasser 10mm/min aux moyennes de cinq vitesses donc on peut considérer ce revêtement polyéthylène utilisé dans l'essai démontre une résistance appropriée à l'arrachement. En d'autres termes, cela signifie que le revêtement est capable de faire une résistance aux forces et aux vitesses d'arrachement prévues dans les conditions spécifiques pour lesquelles la norme a été établie

Conclusion Générale

La corrosion dans les canalisations de transport des hydrocarbures est un problème d'actualité vue les conséquences économiques et environnementales que peut causer une cassure d'un gazoduc ou d'un oléoduc. Pour réduire ce problème, il est nécessaire de protéger les canalisations à l'aide d'un revêtement organique. Pour ce faire, la préparation de surface avant l'application de revêtement est une étape qui doit être maîtrisée notamment la préparation de surface par grenaillage qui doit être exempte de poussière et de graisse avant l'application de revêtement.

Nous avons constaté aussi que les paramètres de marche pendant le processus tels que la vitesse de tube, le temps de maintiens des tubes dans la turbine de grenaillage ainsi que la température de chauffe des tubes pour l'application de revêtement sont des paramètres influençant sur la qualité de l'adhérence de revêtement, pour cela l'Unité ALTUMET effectue l'étalonnage des équipements de mesure et de contrôle pour s'assurer de la fiabilité des résultats obtenus.

Concernant notre étude le contrôle qualité de l'adhérence ont données des résultats de les essais tel que :

- L'essai de décollement cathodique afin d'évaluer la protection contre la corrosion.
- L'essai d'immersion dans l'eau chaude pour vérifier la résistance du revêtement.
- L'essai de résistance à l'arrachement du revêtement pour évaluer la solidité de polyéthylène.

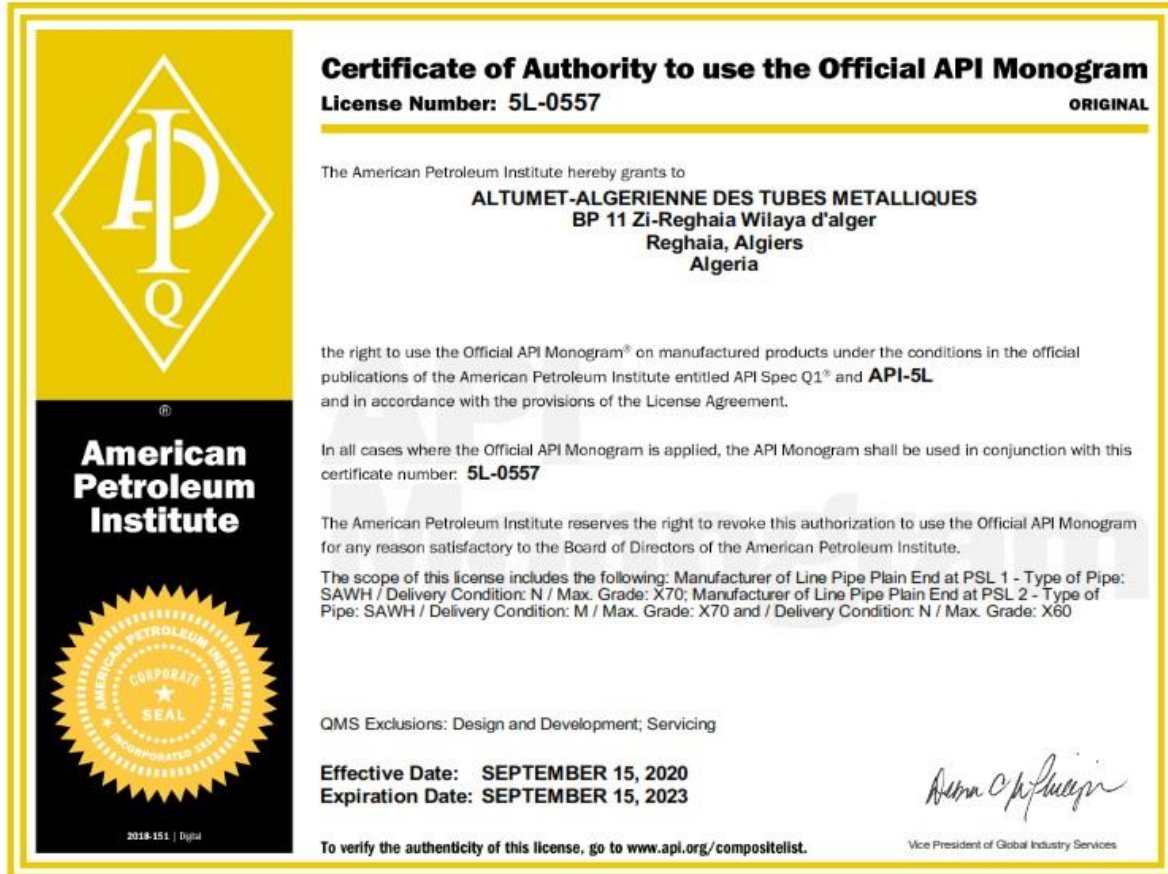
Ces résultats sont satisfaisantes selon la norme ISO 21809-1:2018 (Revêtements externes des conduites enterrées ou immergées utilisées dans les systèmes de transport par conduites) ce qui veut dire que les paramètres de marche de l'installation sont maîtrisés pour garantir une bonne préparation de surface.

Références bibliographique

- [1] encyclopedia of occupational healthy & safety récupéré sur <https://www.iloencyclopaedia.org/fr>
- [2] R. SABOT, Ph. REFAIT, M. JEANNIN, C. REMAZEILLES A. ROMAINE (LaSIE) S. SABLE, I. LANNELUC (LIENSs) , Corrosion et biocorrosion des aciers au carbone, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement,p.06
- [3] BEHISSA Souad, « Contrôle de la qualité du revêtement tri-couche et anti-corrosif du pipe au niveau de l'entreprise ALFAPIPE »,master de Génie des procédés Spécialité :Contrôle de qualité, l'université de Ghardaïa.
- [4] Toukal Linda, « Corrosion et inhibition des puits et collectes pétroliers »,thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif-1 UFAS (Algérie)
- [5] M.Nour El Houda , K. Abdelkader « Corrosion des pipelines: Applications au tronçon Haoud ElHamra », mémoire de master académique , Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
- [6] Juan CREUS, René SABOT, Philippe REFAIT ,corrosion et protection des métaux en milieu marin , 2020, France
- [7] M. Hamida ; T .Fatma « Caractérisation des Revêtements Externes en Polyéthylène et Optimisation des Paramètres de marche », master de génie chimique, université de Boumerdès
- [8] Dr L.kahloul , traitement et surface.
- [9] MEFTAH .S , « Etude de l'influence de la température d'injection sur les propriétés tribologiques d'un alliage AlSi12 » thème de master traitement de surface à ENSMM-ANNABA p05
- [10] M. Abdelhakim, «Etude sur la méthode de maintenance par protection Cas de la ligne de pipeline GZ1 40'',» –Tlemcen, 2014
- [11] «API 5L de la LSIP1/PS2 X42 Linepipe restes explosifs des guerres soudé,» [En ligne]. Available: https://fr.made-in-china.com/co_tcsteelpipe/product_API-5L-X42-Psl1-Seamless-Pipe_eyhiruryy.html
- [12] Documentation technique ALTUMETalger.

Annexe 01

API-5L, AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE



Annexe 02

Certificats ISO 9001 : 2015

