

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



UNIVERSITE DE TLEMEN&FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE  
LABORATOIRE LAEPO

Mémoire  
Pour l'obtention du diplôme du Master

Option : Maintenance Industriel

## THEME

**Etude Sur les Procédés de Traitement  
des Tubes de Pipelines Corrodés  
Acier API 5L X60**

Présenté par :

**M<sup>r</sup>. CHEMANI Younes**

Soutenu le : juin 2013

Devant le Jury composé de :

President	M <sup>r</sup> . M. A. GHERNAOUT	MCA. Université Tlemcen
Encadreur	M <sup>r</sup> . A. BENMOUSSAT	MCA. Université Tlemcen
Co-Encadreur	M <sup>r</sup> . A. BOURDIM	MCA. Université Tlemcen
Examineur:	M <sup>r</sup> . F. SBAAMCB.	Université Tlemcen
Examineur:	M <sup>r</sup> . F. BENKHENAFOU	MCA. Université Tlemcen
Membre invité	M <sup>r</sup> BELABACI Djelloul	Directeur DRC/Sonatrach

## Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier « Dieu » le tout puissant, qui lui seul ma guidé dans le bon sens durant ma vie et qui m'aide à réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier vivement le docteur **BENMOUSSAT Abderrahim** qui accepté de diriger ce travail de recherche. Qu'il trouve ici l'expression de ma grande gratitude pour leur soutien bienveillant et la confiance qu'il m'on manifestés dans les moments les plus difficiles.*

*Je remercie **M<sup>r</sup> BOURDIM Abdelghafour** maitre de conférences l'université de Tlemcen qui m'a aidé tous la durée de ce travail. Qu'il trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance.*

*Je tien remercier, les membres jury, **M<sup>r</sup>. GHERNAOUT Mohamed Amine** (MCA) l'université de Tlemcen qui m'a fait l'honneur de présider le jury de mémoire. Qu'il trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail.*

*Je tien remercie **M<sup>r</sup>. SBAA Fethi** MCB L'université de Tlemcen qui m'a fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de ma vive gratitude et ma sincère reconnaissance.*

*Je tien remercie **M<sup>r</sup>. BENKHENAFOU Fethi** MCA l'université de Tlemcen qui a accepté d'examiner ce mémoire. Qu'il trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail.*

*Je remercie **M<sup>r</sup>.BELABACI Djeloul**, directeur DRC-SONATRACH Bethioua, qui m'a fait le plaisir d'être membre honorable de ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et ma reconnaissance.*

*Je remercie **M<sup>r</sup>. MANSOUR HAFIFI Abdellah** ingénieur d'inspection à la direction de réparation des canalisations (DRC). Qu'il trouve ici l'expression de ma vive gratitude et ma sincère reconnaissance.*

*Je remercie **M<sup>r</sup>. BENLEKHAL Abdelkader** le chef de station des traitements des tubes (STT). Qu'il trouve ici l'expression de ma vive gratitude et ma sincère reconnaissance.*

*Mes remerciements vont également à tous mes amis et collègues de l'université Abou BekrBelkaid de Tlemcen.*

## *Dédicace*

*Avec beaucoup de respect et d'amour*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma mère pour tous les sacrifices, les efforts prodigieux, a consentie pour*

*moi qu'elle trouve ici le témoignage de mon profond amour et respect.*

*Mon père pour le soutien les efforts et les conseils qu'il m'a apporté*

*durant toutes les années d'études.*

*A mes frères.*

*Ma sœur.*

*Mes amis.*

*A toutes la famille Chemani et Dergal.*

*Je dédie cet humble travail à toute la famille universitaire.*

*Chemaniyounes*

## Résumé

Les canalisations enterrées en aciers de transport d'hydrocarbures sont exposés à des risques de défaillances particulièrement d'interactions de type corrosion lorsque les systèmes de protection présentent des défauts donnant lieu à des défaillances entraînant des arrêts d'exploitation de la ligne de pipeline et qui exige des réparations. Ces défaillances dans les pipelines se développent beaucoup plus en surface sous forme de corrosion ou de fissuration et se manifestent par l'apparition des pics de corrosion (pitting corrosion) et la propagation des fissures (cracking corrosion).

Ce travail concerne l'étude sur les procédés de traitement et de réparation des aciers des tubes de pipeline corrodés, aciers à haute limite d'élasticité de type API 5L X60. Le traitement des pipes corrodées s'effectuera sur la base de traitement des surfaces (mécanique, thermique, chimique). Le traitement mécanique superficiel par sablage (projection d'abrasif), permet d'améliorer les propriétés superficielles du matériau afin d'augmenter sa résistance aux sollicitations rencontrées (frottement, corrosion,...) et donc sa durée de vie.

Nous sommes intéressés à l'étude des paramètres de sablage : vitesse, l'angle de projection, granulométrie sur l'état de surface après sablage. Les résultats ont montrés que ces paramètres influent sur l'état de surface.

**Mots clés:** Pipelines, Traitement de surface, Aciers API X60, Maintenance des pipes.

## Abstract

Steelburied pipelinestransporting hydrocarbonsare at riskoffailureparticularlywhensuchinteractions corrosionprotection systems have defects leading to failures resulting from shutdowns line pipeline and requires repairs. These failures in pipelines grow much surface as corrosion or cracking and are manifested by the appearance of peaks corrosion (pitting corrosion) and crack propagation (corrosion cracking).

These works concerns the study of methods of treatment and repair of steel tubes corroded pipeline steels, high strength type API 5L X60. The treatment of corroded pipes will be made on the basis of surface treatment (mechanical, thermal, chemical). The mechanical surface treatment by sandblasting (abrasive blasting), improves the surface properties of the material to increase its resistance to stresses encountered (friction, corrosion ...) and therefore its life.

We are interested in the study of blasting parameters: speed, angle of projection size on the surface after sanding. The results showed that these parameters affect the surface.

**Keywords:** Pipelines, Surface Treatment, API X60 steel, Maintenance pipes.

## ملخص :

الانابيب الناقلة للغاز و خاصة المدفونة تحت التربة اكثر تعرضا للفشل نتيجة لتأثرها بالعوامل الطبيعية التي تتسبب في ظهور تاكلات موضعية، مما يؤدي الى اغلاق القنوات و يتطلب اصلاحها. هذه الاخفاقات في خطوط الانابيب تنمو كثيرا على مستوى السطوح مثل التآكل ( pitting corrosion) وانتشار الشقوق (cracking corrosion).

هذا العمل يتعلق بدراسة طرق علاج و اصلاح الانابيب المتآكلة. هذه الانابيب مصنوعة من الفولاذ الصلب من نوع API 5L X60 لديه مقاومة حد المرونة عالية. وسوف تتاح معالجة الانابيب المتآكلة على اساس المعالجة السطحية (الميكانيكية الحرارية و الكيميائية)، وخاصة اذا كان العلاج ميكانيكي من قبل الكشط بالرمل (traitement mécanique par sablage). يمكن لهذه العلاجات تحسين الخواص السطحية للمواد لزيادة المقاومة للضغوط (احتكاك التآكل...) و بالتالي تمديد في حياتها.

نحن مهتمون في الدراسة بمعايير الكشط بالرمل (paramètre de sablage): السرعة، وزاوية الاسقاط و حجم على السطح بعد الرمي (sablage). وأظهرت النتائج أن هذه المعايير تؤثر على السطح.

## SOMMAIRE

<i>Remercement</i> .....	i
<i>Didicace</i> .....	ii
<i>Résumé</i> .....	iii
<i>Liste de figure</i> .....	viii
<i>Liste des tableaux</i> .....	xi
<i>Principales notation</i> .....	xii
<i>Liste des abréviations</i> .....	xiii
□ <b>Introduction Générale</b> .....	1
<b><u>Chapitre I : Procédés de Réparation en Maintenance</u></b>	
Introduction .....	3
I.1 Procédés de traitements par transformation structurale par voie mécanique .....	5
I.1.1 Grenailage .....	5
I.1.1.1 Principe .....	5
I.1.1.2 Avantages de grenailage .....	6
I.1.1.3 Nature des projectiles .....	6
I.1.1.4 Grenailage de précontrainte (SHOT PEENING) .....	7
a : Contrôle de l'opération de grenailage de précontrainte .....	7
b : Influence des divers paramètres de grenailage .....	8
I.1.1.5 Description de la machine .....	8
a- grenailleuse .....	8
b- Le microbillage bille de verres .....	9
c- Différents types de machines .....	9
I.1.2 Sablage .....	11
I.1.2.1 Principe .....	11
I.1.2.2 Choix du matériau abrasif .....	12
I.1.2.3 Sableuse .....	12
I.1.3 Condition de réalisation des traitements mécaniques .....	14
I.2 Procédés de traitements par transformation structurale par voie thermique .....	14
I.2.1 Chauffage superficiel .....	14
I.2.2 Trempe superficielle de l'acier .....	14
I.2.3 Procédé par soudage .....	15
I.2.3.1 la soudure .....	15
I.2.3.2 Soudabilité des aciers .....	17
I.2.3.3 Procédés de la soudure .....	18
a- Soudure à l'arc électrique protégée en métal .....	18
b- Soudure à l'arc électrique submergée .....	18
c- Soudage à l'arc sous gaz avec fil électrode fusible .....	19

d- Soudure à l'arc électrique de noyau de flux .....	19
e- Soudure d'arc à tungstène de gaz.....	20
I.2.3.4 Paramètres de soudure.....	20
I.2.3.5 Soudure mécanisée.....	20
I.2.4 Projection thermique .....	21
I.3 Procédés de traitements par transformation structurale par voie chimique .....	21
I.3.1 Par diffusion .....	21
I.3.2 Par revêtement .....	22
a- Les revêtements par voie chimique .....	22
b- Revêtements par voie électrolytique .....	22
I.3.3 Principales opérations de préparation de surface .....	22
I.3.2.1 Dégraissage .....	22
I.3.3.2 Décapage (décalaminage, dérouillage, dérochage).....	23
I.3.3.3 Ébavurage, polissage, brillantage, satinage .....	23
I.3.3.4 Démétallisation .....	23
I.3.3.5 Dégazage .....	23
I.3.3.6 Lavage, rinçage, égouttage, séchage .....	23
I.4 Contrainte résiduels .....	24
I.5 Revêtement des tubes.....	25
I.5.1 Revêtements extérieures.....	25
I.5.1.1 Revêtement Fusion Bonded Epoxy (FBE).....	25
I.5.1.2 Revêtement extérieur polyoléfine 3 couches .....	26
I.5.2. Revêtements intérieurs .....	26
I.6 Caractéristiques des résines PU .....	27
I.6.1 Adhérence .....	27
I.6.2 Résistance au choc .....	28
I.6.3 Résistance à l'humidité .....	29
I.6.4 Résistance au décollement cathodique .....	30
I.6.5 Résistance d'isolement .....	31
I.7 Tribologique ou Mécanique de contact .....	32
I.8 Procédé de fabrication des tubes.....	33
I.8.1 Les tubes soudés sous forme spirale .....	33
I.7.2 Les tubes soudés sous forme longitudinale.....	34
I.7.3 Tubes sans soudure .....	36
I.8 Synthèse bibliographique .....	36
Conclusion .....	37
<b><i>Chapitre II : Contexte Industriel</i></b> .....	
Introduction .....	38
II.1 Description de la STT.....	39
II.1.1 Réalisations de la STT .....	39

II.1.2 Activités de la STT .....	39
II.2 les pipelines .....	40
II.2.1 Définition.....	40
II.2.2 Défauts rencontrés dans les canalisations.....	40
II.3 Evolution des gazoducs .....	41
II.4 Acier de gazoducs.....	42
II.4.1 Affinements de grain ferritique .....	44
II.4.1.1 Effet de la taille du grain .....	44
II.4.1.2 Effets de laminage .....	44
a- Laminage normale .....	45
b- Laminage contrôlé .....	45
II.4.1.3 Effets du durcissement .....	47
a- Durcissement par solution solide .....	47
b- Durcissement par précipitation .....	47
c- Durcissement par diminution de la taille du grain ferritique .....	48
II.4.1.4 Effets du taux de carbone .....	48
II.5 Caractéristiques des aciers (norme API 5L) .....	50
II.5.1 Caractéristique mécanique .....	50
II.5.2 Composition chimique .....	51
II.6 Ténacité de l'acier .....	51
II.7 Description de la ligne GZ1 40'' .....	52
II.7.1 présentation de la ligne .....	52
II.7.2 Caractéristiques du matériau de l'étude X60.....	56
II.7.2.1 Composition chimique du matériau .....	56
II.7.2.2 Essai de traction (caractéristique mécanique).....	56
II.8 Inspection en ligne et diagnostic .....	58
II.8.1 Action de pré-inspection .....	58
II.8.2 Outils d'inspection en ligne .....	59
II.8.2.1 Les techniques MFL .....	59
II.8.2.2 Les outils ultrasoniques .....	60
II.8.3 Evaluation des défauts détectés durant l'inspection .....	62
II.9 Contrôle non destructives (CND) .....	63
II.9.1 Contrôle visuel .....	63
II.9.2 Contrôle ultrasonore .....	63
II.9.3 Contrôle radiographique .....	63
II.10 Système de protection .....	64
II.10.1 Protection passive .....	65
II.10.2 Protection active .....	66
II.11 Historique des défaillances (par outil intelligent).....	67

II.12	Procédés de réparations .....	70
II.12.1	collage par patch .....	70
II.12.1.1	Définition .....	70
II.12.1.2	Avantage de collage par patch .....	71
II.12.1.3	Zones critiques de patch .....	72
II.13	Clockspring.....	72
II.14	Réparation par demi-coquilles soudées .....	74
II.15	Choix de la nature de la réparation .....	75
	Conclusion.....	76
	<b><i>Chapitre III : Matériels et Méthodes</i></b>	
III	Introduction .....	77
III.1	Machine de sablage .....	78
III.2	Caractéristiques du matériau abrasif .....	80
III.2.1	Choix du grain .....	80
III.2.2	Caractéristiques de l'abrasif utilisé (Corindon $Al_2O_3$ ) .....	80
III.2.2.1	Définition .....	80
III.2.2.2	Propriétés et composition chimique du corindon .....	81
III.3	Caractéristiques du sablage .....	82
III.3.1	vitesse projection .....	82
III.3.2	Mesure de la vitesse des particules du corindon .....	84
III.3.3	Angle de projection .....	85
III.3.4	Les buses .....	85
III.3.5	Etat de surface .....	86
III.3.6	Distribution de la taille des grains .....	87
III.4	Essai de sablage .....	89
III.4.1	Paramètres des essais .....	89
III.4.2	Condition d'essai .....	90
III.4.3	Perte de masse et calcul du volume érodé .....	90
	Conclusion .....	99
	<b><i>Chapitre IV : Résultats et Discussions</i></b>	
IV	Introduction .....	100
IV.1	Perte de masse et volume érodé par sablage .....	100
IV.2	Vitesse de sablage .....	101
IV.3	Effet de granulométrie .....	101
	Conclusion .....	102
	<b><i>Conclusion Générale</i></b> .....	103
	<b><i>Bibliographie</i></b> .....	105
	<b><i>Annexe</i></b> .....	108



## Liste des figures

### Chapitre I

**Figure I.1:** Grenailage de surface fissurée

**Figure I.2:** microbilles de projection

**Figure I.3:** grenailleuse automatique COGEIM

**Figure I.4:** Projection par turbine

**Figure I.5:** Projection par air comprimé : système à dépression

**Figure I.6:** Projection par air comprimé système à pression

**Figure I.7:** abrasif en fibre de verre

**Figure I.8:** sableuse automatique modèle AOB 32636

**Figure I.9:** Sableuse manuelle

**Figure I.10:** schématisation de chauffage aux courants de haute fréquence

**Figure I.11:** Principe du chauffage par induction

**Figure I.12:** Schémas de principe des différents procédés

**Figure I.13:** Schémas de principe des différents procédés

**Figure I.14:** illustration de la soudure à l'arc électrique protégée en métal

**Figure I.15:** illustration de la soudure à l'arc électrique submergée

**Figure I.16:** illustration du soudage à l'arc sous gaz avec fil électrode fusible

**Figure I.17:** illustration de la soudure à l'arc électrique de noyau de flux

**Figure I.18:** illustration de la soudure d'arc à tungstène de gaz

**Figure I.19 :** vireur et potence de soudage mécanique

**Figure I.20:** principe de la projection thermique

**Figure I.21:** Effets des contraintes résiduelles sur les performances des matériaux

**Figure I.22:** origines des contraintes résiduelles

**Figure I.23:** Revêtement FBE

**Figure I.24:** Revêtement extérieur

**Figure I.25:** Revêtements en résine époxy liquide pour les pipelines d'eau

**Figure I.26:** Exigences minimales des forces d'adhérence selon quelques normes

**Figure I.27:** Exigences minimales de l'énergie d'impact à température

**Figure I.28:** Tests d'absorption d'humidité de films libres obtenus à partir de formulations à base de résines PU

**Figure I.29:** Représentation schématique du montage pour le test du décollement cathodique.

**Figure I.30:** Représentation schématique des exigences minimales pour le test de la résistance spécifique exprimée en  $\text{Ohm.m}^2$  des revêtements en résines PU

**Figure I.31:** Représentation schématique d'un contact tribologique

**Figure I.32:** Technique de fabrication des tubes soudés en spirale

**Figure I.33:** L'angle d'introduction de la bande

**Figure I.34:** soudure spirale

**Figure I.35:** soudure longitudinale

**Figure I.35 a:** croquage

**Figure I.35 b:** Formage sous forme "U"

**Figure I.35 c** : Formage sous forme "O"

**Figure I.35 d**: soudage

**Figure I.35 e**: Expansion

**Figure I.36**: Fabrication de pipe sans soudure

## **Chapitre II**

**Figure II.1**: lieu de stockage des tubes

**Figure II.2**: pipeline

**Figure II.3**: Eclatements avec rupture franche de la canalisation

**Figure II.4**: évolution des gazoducs depuis 40 ans

**Figure II.5**: effet de la taille du grain ferritique sur la limite d'élasticité

**Figure II.6**: effets de la taille du grain ferritique sur la température de transition

**Figure II.7**: laminage contrôlé

**Figure II.8**: principe de laminage contrôlé

**Figure II.9**: durcissement par solution solide

**Figure II.10**: durcissement par précipitation

**Figure II.11**: la variation de la résistance par rapport au taux de carbone

**Figure II.12**: effet du taux de carbone sur la courbe de transition CHARPY (constant et al, 1992)

**Figure II.13**: Station de compression de la ligne **GZ1**

**Figure II.14**: éprouvette de l'essai

**Figure II.15**: éprouvette de traction avant et après essai

**Figure II.16**: Courbe effort allongement

**Figure II.17**: Piston Instrumenté basé sur le principe de perte de flux magnétique

**Figure II.18**: Outil intelligent Magne-Scan HR

**Figure II.19**: Principe de détection des défauts (Palpeur émission - Palpeur réception) des ondes ultrasonores

**Figure II.20**: Radiographie d'une soudure longitudinale sur un tube en acier

**Figure II.21**: Radiographie d'une soudure, fissure sous-jacente

**Figure II.22**: revêtement polyuréthane PU STT

**Figure II.23**: revêtement polyuréthane (usine)

**Figure II.24**: principe de la protection cathodique

**Figure II.25**: la géométrie d'un collage par patch d'une pipe

**Figure II.26**: Dimensions principales de patch

**Figure II.27**: Zones critiques de patch

**Figure II.28**: clock spring

**Figure II.29**: installation de clockspring

**Figure II.30**: géométrie de demi-coquilles

**Figure II.31**: Opération de soudages de demi coquilles

### Chapitre III

**Figure III.1:** schéma de la machine de sablage type Blaster 2700.

**Figure III.2:** Photographie du corindon brun, blanc et semi-friable

**Figure III.3:** la variation de la rugosité en fonction de la vitesse

**Figure III.4:** Variation de la vitesse du flux d'air en fonction de la distance.

**Figure III.5:** Angle de projection (impact)

**Figure III.6:** micrographies montrant une amélioration de la rugosité de surface

**Figure III.7:** 3-Dprofils de rugosité de surface avant et après sablage

**Figure III.8:** Forme des grains du corindon.

**Figure III.9:** Facteur de forme des particules du corindon brun utilisé

**Figure III.10:** Distribution de la taille des grains du corindon brun utilisé

**Figure III.11:** Sens longitudinal et transverse du tube.

**Figure III.12:** Montage porte éprouvette

**Figure III.13:** géométrie de l'éprouvette

**Figure III.14:** Angle et Rayon d'entaille

**Figure III.15:** Evaluation de la perte de masse dans le sens longitudinal (**L**) en fonction de Temps de sablage

**Figure III.16:** Evaluation de la perte de masse dans le sens longitudinal (**L**) en fonction de Rayons d'entaille

**Figure III.17:** Evaluation de la perte de masse dans le sens transversal (**T**) en fonction de Temps de sablage.

**Figure III.18:** Evaluation de la perte de masse dans le sens transversal (**T**) en fonction de Rayons d'entaille.

**Figure III.19:** Evaluation du volume érodé dans le sens longitudinal (**L**) en fonction de Temps de sablage.

**Figure III.20:** Evaluation du volume érodé dans le sens longitudinal (**L**) en fonction de Rayons d'entaille.

**Figure III.21:** Evaluation du volume érodé dans le sens transversal (**T**) en fonction de Temps de sablage.

**Figure III.22:** Evaluation du volume érodé dans le sens transversal (**T**) en fonction de Rayons d'entaille.

## Liste des tableaux

### Chapitre I

**Tableau I.1:** Caractéristiques de l'état de surface

### Chapitre II

**Tableau II.1:** Propriétés mécanique des aciers pour tubes selon la norme API

**Tableau II.2:** composition chimiques en % de l'acier X60 et X100

**Tableau II.3:** caractéristiques des canalisations du sud algérien

**Tableau II.4:** Implantation stations de compressions **GZ1**

**Tableau II.5:** spécification technique de la ligne **GZ1 40''**

**Tableau II.6:** paramètre énergétiques maximums d'écoulement du gaz a la sortie des stations de compression SC de **GZ1**

**Tableau II.7:** Composition chimique (en %)

**Tableau II.8:** résultat d'essai de traction

**Tableau II.9:** résultats de l'inspection de la pipe **GZ1**

**Tableau II.10:** Description des zones critiques

**Tableau II.11:** Qualité d'activateur pour l'adhésif

### Chapitre III

**Tableau III.1:** Caractéristiques techniques de sableuse

**Tableau III.2:** Critères du classement des machines de sablage.

**Tableau III.3:** Propriétés physiques du corindon

**Tableau III.4:** Propriétés mécaniques du corindon à 20°C.

**Tableau III.5:** composition chimique du corindon

**Tableau III.6:** importance de la rugosité en fonction de la variation du calibre de l'abrasif et de sa vitesse

**Tableau III.7:** la variation granulométrie en fonction de pression et diamètre de buses

**Tableau III.8:** Valeurs de perte de masse et de volume érodé, dans le sens **L**, pendant le sablage.

**Tableau III.9:** Valeurs de perte de masse et de volume érodé, dans le sens **T**, pendant le sablage.

**Tableau III.10:** Valeurs des constantes de formule mathématique de variation du volume érodé en fonction de temps de sablage.

**Tableau III.11:** Valeurs des constantes de formule mathématique de variation de perte de masse en fonction de temps de sablage.

## Notations principales

SC1: station de compression n°1

SC2 : station de compression n°2

X60 : désignation américaine pour les aciers des gazoducs

PK: Point kilométrique

GZ1 : gazoduc n°=1

Céq : carbone équivalent (%)

PH :Potentiel-Hydrogène

Ar<sub>3</sub> : Température de début et de fin de transformation  $\gamma \rightarrow \alpha$  au chauffage (c°)

d: taille de grain ferritique (mm<sup>-1/2</sup>)

K<sub>y</sub> : constante

V<sub>r</sub> : vitesse de refroidissement (m/s)

P : pression (bar)

$\sigma_c$ : la contrainte circonférentielle

R :Rayon (mm)

e :épaisseur (mm)

fp : ferrite polygonale

fa: ferrite-aciculaire

Rt:Rugosité totale (microns)

Ra: Rugosité moyenne (microns)

v : vitesse (m/s)

L<sub>g</sub>, l<sub>g</sub>:longueurs extrêmes de la particule (mm)

Fs:Rapport entre la plus grande dimension L<sub>g</sub> mesurée dans une direction et la dimension la plus grande l<sub>g</sub> mesurée dans la direction perpendiculaire.

$\rho$  : Le rayon d'entaille de l'éprouvette (mm)

t : Temps de sablage (heure)

y<sub>0</sub>, a<sub>c</sub>, b<sub>c</sub>: Constants pour calculer perte de masse et volume érodé.

## Liste des abréviations

STT: Station de traitement des tubes

DRC: Direction Réparation des Canalisations

HR: HassiR'mell

AR: Arzew

HEH: Haoude El Hamra

HMD:Hassi Messaoud

HLE: haute limite d'élasticité

TMCP:Thermo Mechanical Control Process

HSLA:High Strength Low Alloy steels

API: American PetroleumInstitute

Copie interdite

# ***Introduction Générale***

## Introduction

Le transport du gaz dans des conditions économiques nécessite l'utilisation de pressions de transport aussi élevée que possible, ce qui nécessite l'emploi d'aciers de plus en plus résistants dont les propriétés sont adéquates.

Les sites de production de gaz sont souvent très éloignés des centres de consommation. Le gaz est alors acheminé à l'aide de canalisations sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres.

Un gazoduc est une structure dont l'intégrité doit être garantie. En particulier, pour éviter tout amorçage de rupture, le dimensionnement de la structure est effectué pour travailler dans le domaine élastique avec un coefficient de sécurité adéquat, ce qui autorise une taille critique de défaut. De plus, la température de transition ductile fragile de l'acier est choisie de façon à empêcher une rupture fragile du tube. De plus, la sécurité des installations demande une bonne ténacité pour éviter la ruine de la structure par propagation rapide des fissures.

Aujourd'hui les objectifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs vont dans le sens de la réduction des coûts, de l'amélioration des performances et de la productivité. Les pipelines ou équipements doivent résister à des sollicitations nombreuses :

- Sollicitations internes : contraintes mécaniques, fatigue, fluage... ;
- Sollicitations externes : frottement, abrasion, température, érosion, frettage... ;
- Sollicitations environnementales : corrosion, oxydation, attaque chimique, chaleur...

Pour augmenter la rentabilité d'un gazoduc, il est intéressant d'utiliser des structures de diamètre plus grand et de transporter le gaz sous une pression élevée. Les conditions de transport des gazoducs de 1910 à 2000 ont été améliorées, le diamètre a été multiplié par 4 et la pression de transport par 60. Ces augmentations dans les performances ont été possibles grâce à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des aciers utilisés pour la fabrication des tubes et éviter toute augmentation trop importante de l'épaisseur des tubes rendant les coûts de production et d'investissement rédhibitoires. Les aciers HLE à haute limite d'élasticité sont de plus en plus utilisés. Ils ont été développés par des schémas métallurgiques comme les procédés TMCP (Thermo Mechanical Control Process) permettant d'affiner le grain ferritique par laminage et refroidissement contrôlé des tôles d'aciers. Les aciers pour pipelines ont été classés d'après la norme API (American Petroleum Institute).

Quelle que soit leur microstructure, les aciers pour les gazoducs appartiennent à la classe des aciers dite HSLA (*High Strength Low Alloys*). Ces aciers sont caractérisés par des propriétés mécaniques, et par leur microstructure. Les performances dans les propriétés mécaniques ont été obtenues par des schémas



métallurgiques de traitement thermomécanique permettant d'obtenir une haute limite d'élasticité, et une fine microstructure à grains ferritiques.

L'obtention d'une haute limite d'élasticité et d'une bonne ténacité ne doit pas s'accompagner de la dégradation d'autres propriétés d'emploi tel que la soudabilité et la résistance à la corrosion. Les tests de laboratoire sont nécessaires pour déterminer la composition chimique ou les caractéristiques mécaniques des aciers tels que leurs résistances mécaniques ou leur dureté.

Les travaux de recherche ou d'expertise des lignes de gazoducs ont montrés que malgré cette amélioration dans les propriétés des aciers et les méthodes de protection, les défaillances se sont produits sur les surfaces externes des aciers par des phénomènes de corrosion ou de fissuration causés soit par des facteurs humains ou par corrosion ou mouvement du sol. La corrosion est la deuxième cause après les accidents dus au mouvement du sol, qui endommage les aciers des pipelines par la formation et propagation des pics de corrosion qui par le temps réduit l'épaisseur, jusqu'à l'éclatement. Elle se manifeste sous plusieurs modes chimique, mécanique ou biologique, comme la corrosion localisée, corrosion sous contraintes ou induite par hydrogène, corrosion généralisée, corrosion biologique...

Nous sommes intéressés dans ce travail à l'étude d'un tronçon de 20 km (entre sc1 et sc2) de la ligne **GZ1 40"** qui relie le gisement de gaz naturel HassiR'Mell à Arzew sur une distance de 507 Kms. Les données relatives à ce travail ont été recueillies lors de notre stage au niveau de la société SONATRACH, **DRC** (direction de réparation des canalisations) à Bethioua (Algérie), station de traitement des tubes (**STT**). L'évaluation des pipes corrodées s'effectuera sur la base de traitement des surfaces (mécanique, thermique, chimique), en cas particulier le traitement mécanique par sablage (projection d'abrasif), ces traitements permettent d'améliorer les propriétés superficielles du matériau afin d'augmenter sa résistance aux sollicitations rencontrées (frottement, érosion, corrosion,...) et donc sa durée de vie. Les procédures de réparations et renforcement des canalisations corrodées par la pose d'un ou plusieurs manchons de renforcement en matériaux composite (collage par patch, clockspring, demi-coquille), ce type de renforcement présente l'avantage de pouvoir s'effectuer sur canalisation en charge.

Nous présenterons dans le premier chapitre les procédés de réparation en maintenance et dans le chapitre 2 le contexte industriel de traitement des tubes corrodés à la station de traitement des tubes STT à Sonatrach Bethioua. Le chapitre 3 sera consacré à une étude de simulation du sablage à débit constant durant toute l'opération de sablage sur des échantillons prélevés de pipe dans le sens longitudinal (L) et transversal (T). Les résultats seront discutés dans le dernier chapitre et nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale.

Copie interdite

***CHAPITRE I***  
***PROCEDES DE REPARATION EN***  
***MAINTENANCE***

## Introduction

Le transport par canalisation a été développé pour acheminer des quantités importantes d'hydrocarbures sur de grandes distances. En Algérie, la société Sonatrach exploite un réseau de plus 18 000 Km tout diamètre confondu. Les tubes en aciers sont protégés par un revêtement bitumineux ou en polymère afin d'isoler l'acier contre les agressions extérieures comme la corrosion, l'effet microbiologique.... Cette protection est complétée par un système de protection cathodique dont le but est de maintenir l'acier dans son domaine de protection.

Cependant, les tubes enterrés peuvent être exposés à des risques d'interactions de type corrosion particulièrement lorsque les systèmes de protection présentent des défauts donnant lieu à des défaillances entraînant des arrêts d'exploitation de la ligne de pipeline et qui exige des réparations. Ces défaillances dans les pipelines se développent beaucoup plus en surface sous forme de corrosion ou de fissuration et se manifestent par l'apparition des pics de corrosion (pitting corrosion) et la propagation des fissures (cracking corrosion). Les facteurs impliqués sont nombreux. Ils peuvent être de nature chimique, électrochimique, mécanique ou biologique rendant le phénomène d'endommagement plus complexe.

La notion de défaillance selon la norme X60-010(AFN88) stipule que toute cessation d'un dispositif à accomplir une fonction requise est une défaillance. Toute défaillance qui se trouve sur un chemin critique ou sous une critique de sécurité de production ou de qualité devra faire l'objet d'une action de traitement, réparation et de maintenance [1]

Les traitements envisagés sont particulièrement des traitements de surfaces qui sont toutes les opérations mécaniques, chimiques, électrochimiques ou physiques qui ont pour conséquence de modifier l'aspect ou la structure de la surface des matériaux, afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données.

Le but des traitements de surface est fort variable : ils peuvent tendre à améliorer les propriétés optiques (ou l'aspect esthétique), la résistance à la corrosion, la tenue de surfaces soudées, la conductivité, les propriétés mécaniques, la résistance au frottement et à l'usure. Le nombre et la disparité des traitements de surface sont pratiquement infinis. Cependant, l'élaboration d'un traitement donné, son comportement dans les conditions d'utilisation, son efficacité, sa durée de vie peuvent être en bonne partie décrits et prévus par la connaissance de quelques principes de base gouvernant les phénomènes fondamentaux que sont la corrosion électrochimique, la diffusion à l'état solide, la plasticité.

Ces traitements permettent d'améliorer les propriétés superficielles du matériau afin d'augmenter sa résistance aux sollicitations rencontrées (frottement, érosion, corrosion,...) et donc sa durée de vie. [2]

Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie , c'est-à-dire de la mécanique de contact.

Les objectifs des traitements de surface peuvent être définis comme une opération ou plutôt comme un ensemble d'opération sur un métal pour obtenir les trois finalités suivantes :

- une surface propre, c'est-à-dire débarrassé de toutes ses souillures comme les huiles et les graisses ou encore les oxydes métalliques.
- Une surface protectrice vis-à-vis du milieu extérieur car les aciers en général, comme nous l'avons vu, sont sujets aux phénomènes d'oxydation et de corrosion. il faut préserver le métal des altérations susceptibles de se produit à tout moment.
- Une surface homogène pour qu'elle reçoive le revêtement de finition qui lui est destiné (le plus souvent une peinture). [3]

On distingue :

- Traitements mécaniques : Ébavurage, Brunissage, Galetage, Grenailage, Sablage, Polissage
- Traitements optiques : Un traitement antireflet, constitué de plusieurs couches minces de matériaux transparents, est parfois utilisé sur des vitres ou des verres de lunettes.
- Traitements de conversion : Électrolytique (anodisation, sulfuration), Chimique (phosphatation, chromatisation), mécanique (Soféisation).
- Traitements thermochimiques de diffusion : Diffusion d'éléments non métalliques carbonituration (dont la cémentation et la nitruration sont des cas particuliers), boruration, sulfurations, bleuissage. Diffusion d'éléments métalliques (chromisation, aluminisation)
- Traitements par transformation structurale : On distingue deux voies :
  - ✓ Voie thermique : fusion superficielle, trempe superficielles, recuit, revenu, hexa-plasma
  - ✓ Voie mécanique : grenailage, galetage
- Traitements organiques et organo-minéraux : ces traitements peuvent se faire :
  - ✓ application d'un revêtement de Peinture (matière) par enduction par thermolaquage,
  - ✓ par électrophorèse ou cataphorèse

Les opérations de traitements de surfaces sont effectuées dans des ateliers de traitements de surface et sont en accord avec la législation en vigueur.[4]

L'objectif de ce chapitre est de présenter les opérations de traitement des canalisations et les outils pour leur traitement, aussi les procédés de réparation (soudure) et les revêtements.

## I.1 Procédés de traitements par transformation structurale par voie mécanique

Les traitements de surface mécaniques sont des procédés qui permettent d'améliorer les performances des matériaux par une action combinée de durcissement superficiel, de modification structurale et d'introduction de contraintes résiduelles de compression grâce à une déformation plastique hétérogène à la surface des composants mécaniques. Ces traitements sont basés par une action mécanique, selon le type on distingue : le grenailage basé sur la projection de microbilles ou grenailles et le sablage basé sur la projection de matériaux abrasifs.

Lorsqu'il s'agit de modifier les caractéristiques mécaniques, on parle de grenailage de précontrainte. [5]

### I.1.1 Grenailage

Le grenailage est une technique consistant à projeter, à l'aide d'une grenailleuse, des microbilles sur la surface d'un objet pour en modifier la structure superficielle. Les microbilles sont réalisées dans des matériaux de dureté différente suivant l'objectif à atteindre. On utilise couramment des billes en acier ou céramique, on peut utiliser le grenailage dans un but de nettoyage. [6]

#### I.1.1.1 Principe

Le principe est la projection à grande vitesse et en continu, jusqu'à 100 m/s, de petites billes d'acier, de verre ou de céramique, sur la surface des pièces à traiter. Sous cette action de martelage ou de matage ou d'écrouissage, la surface dépasse sa limite d'élasticité et subit une déformation plastique sur une couche très mince (de quelques centièmes à quelques dixièmes de millimètre).

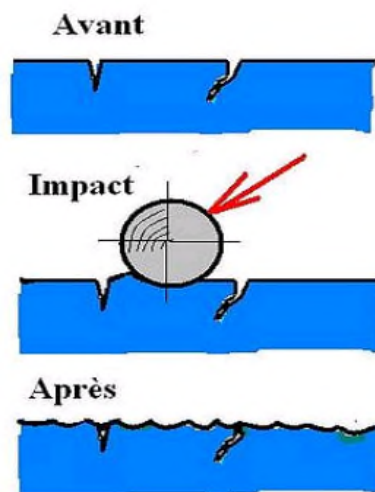


Figure I.1 : Grenailage de surface fissurée [4]

Le résultat à obtenir dépend de plusieurs facteurs :

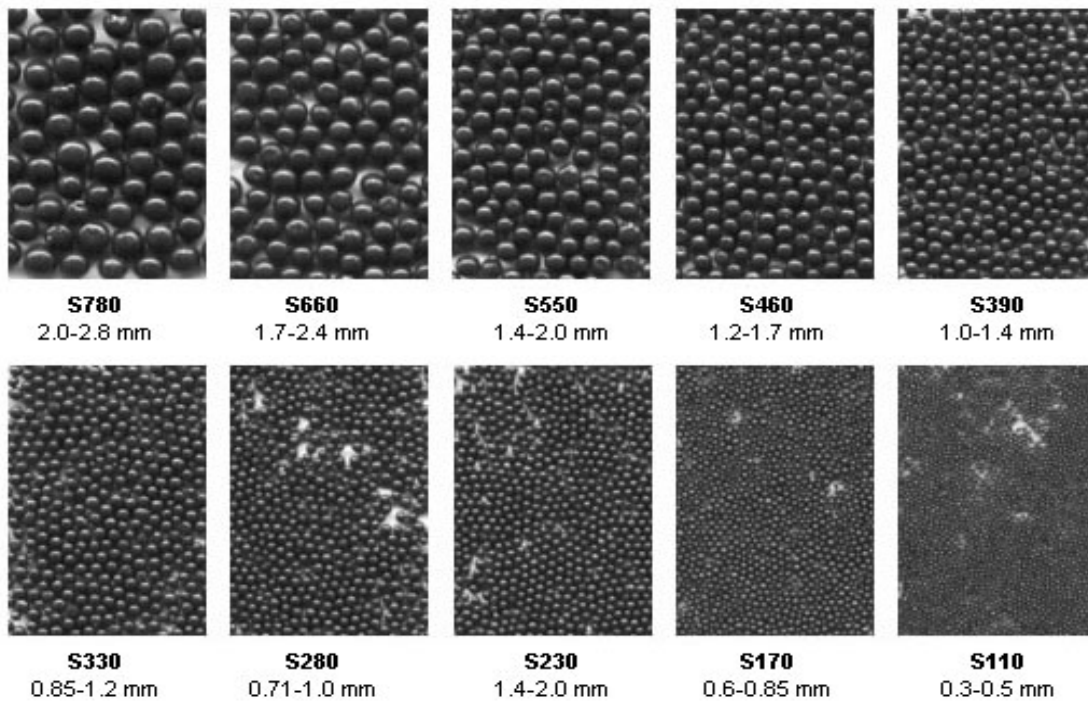
- la nature de la matière à traiter,
- la nature et la dimension de la grenaille,
- le débit et la vitesse d'impact,
- la direction du jet.

#### **I.1.1.2 Avantages de grenailage :**

- Moins coûteux que le traitement thermique traditionnel comme la trempe, ne demande pas de recuit ou de revenu après traitement,
- ne déforme pas les pièces,
- améliore la durée de vie et la résistance à la fatigue des pièces (jusqu'à 10 fois pour un ressort hélicoïdal),
- permet la conception de pièces plus légères et moins coûteuses,
- apporte une protection anticorrosion supplémentaire,
- neutralise les défauts de surfaces brutes de fonderie,
- forme de microscopiques poches de lubrification,
- s'applique à différents types de métaux (aciers, fontes, bronze, aluminium, magnésium),
- réutilisation des microbilles après nettoyage. [4]

#### **I.1.1.3 Nature des projectiles**

- Métalliques (acier coulé, fonte, fils coupés, aluminium...),
- Minéraux (corindon, quartz, billes de verre, billes de céramique...),
- Granulés de glace (hydrique, carbonique). (Annexe 3)



**Figure I.2 :** microbilles de projection

#### I.1.1.4 Grenailage de précontrainte (SHOT PEENING)

Le grenailage de précontrainte ou shot peening est un traitement qui consiste à projeter à grande vitesse de petites billes d'acier sphériques, de verre, de céramique ou de fil coupé rodé. Le but principal du grenailage de précontrainte est d'augmenter la durée de vie des pièces ou des ensembles mécaniques soumis à des sollicitations dynamiques ou à divers problèmes de corrosion (corrosion sous contrainte, fatigue-corrosion, fretting).

Le domaine d'application est très vaste et se retrouve dans la majorité des secteurs industriels. Il est important de contrôler en permanence les conditions de grenailage afin d'assurer une reproductibilité et une qualité totale.[6]

##### a- Contrôle de l'opération de grenailage de précontrainte

Les grandeurs suivantes sont à contrôler :

- L'intensité de grenailage (qui permet le réglage de la machine),
- Le taux de recouvrement (qui définit le temps de grenailage),
- Le temps de recouvrement (qui permet d'apprécier l'usure des abrasifs).

## b- Influence des divers paramètres de grenailage

### b.1 Choix de grenailles

Les grenailles peuvent être classées en 4 catégories :

- Grenailles rondes en acier coulé,
- Grenailles obtenues à partir de fil coupé rodé,
- Grenailles de céramique,
- Microbilles de verre.

Les paramètres définissant la qualité de ces grenailages sont nombreux. On tiendra compte de leurs :

- Nature (composition chimique, structure...),
- Granulométrie, dureté, propreté...
- Résistance à l'usure et à la rupture.

### b.2 Influence de la nature des pièces à grenailier

L'efficacité d'un grenailage dépend de la nature des pièces à grenailier qui influe directement sur :

- La réparation et le niveau des contraintes résiduelles introduites,
- La stabilité de ces contraintes pour des matériaux de résistance élevée.

### b.3 Les avantages de grenailage de précontrainte

- L'amélioration de la tenue en fatigue par diminution des contraintes résiduelles de tension et création de contraintes de compression à la surface des pièces.
- La disparition des contraintes résiduelles de tension introduites dans les pièces au cours de différentes opérations : rectification, traitement thermique, soudage...
- La diminution de la sensibilité à l'entaille des pièces forgées ou usinées de même que la résistance à la corrosion sous contrainte. [6]

#### I.1.1.5 Description de la machine

##### a) grenailleuse

Une grenailleuse est une machine qui projette de la grenaille sous forme de micros-billes pour décaper une surface de la matière qui la recouvre. Le principe s'appelle le grenailage (figure I.3). En mécanique et en métallurgie, la grenailleuse est une machine destinée à exécuter l'opération de grenailage, étape incontournable de parachèvement des pièces brutes de démoulage après la coulée ou brut de forgeage. Le système de projection est généralement la turbine. C'est une machine qui travaille en



vase clos pour des questions de sécurité (projection de micros-billes à grande vitesse, poussière, etc.), dans laquelle des pièces brutes sont traitées avant opérations de finition. Selon le type de pièces, les séries à produire et le degré de parachèvement. [4]



**Figure I.3 :** grenailleuse automatique COGEIM (STT)

#### **b) Le microbillage bille de verres**

Contrairement aux abrasifs courants utilisés en sablage humide ou sec, le microbillage ne provoque pas d'abrasion de la surface. De plus, il améliore les tenues en fatigue et les tenues à la corrosion sou contrainte de nombreux substrats. Le microbillage à la bille de verre est adapté pour des opérations de nettoyage, pour l'élimination des contraintes internes de tension en donnant des surfaces uniformes, pour les traitements de finition (aspect esthétique), pour le contrôle d'adhérence de certains revêtements (argent).

Le microbillage à la bille de verre peut être utilisé soit en phase liquide, soit à sec dans des machines à projeter de type classique. [6]

#### **c) Différents types de machines**

Il existe deux types de machines à projeter : à turbine ou à air comprimé.

##### **➤ A turbine**

Le projectile est introduit par simple gravité dans une turbine fonctionnent à grande vitesse où il est centrifugé. Une pièce de contrôle permet de déterminer le mode d'injection des projectiles sur les palettes de la turbine. Ceci permet de modifier, par exemple, la géométrie de la gerbe de grenailles projetées et l'angle d'incidence. Le procédé utilisé avec des billes d'acier est efficace pour de grandes séries de des

pièces, mais présente des inconvénients dans le cas des pièces à géométrie complexe où l'on peut observer un recouvrement irrégulier (nombre d'impacts sur la surface), figure I.4.

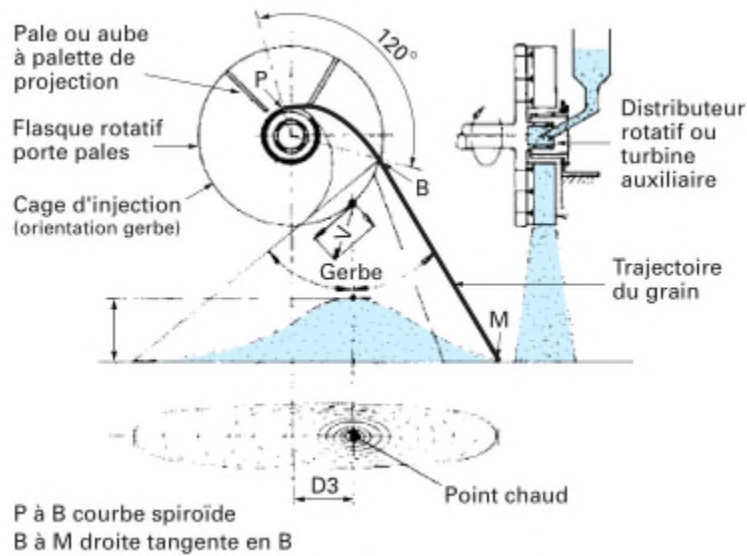


Figure I.4 : Projection par turbine[7]

➤ **A air comprimé**

Ces machines sont de trois types :

▪ **A dépression**

Le principe est basé sur l'aspiration et projection. A cause de l'effet Venturi dû à l'injecteur d'air placer dans le pistolet, il se produit une dépression générant une aspiration d'air avec transport de projectiles jusqu'au pistolet (angle de 30 à 40 degrés).

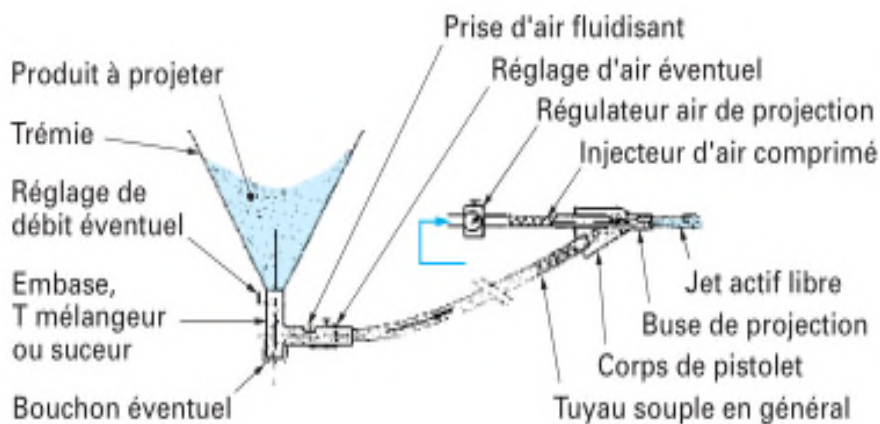
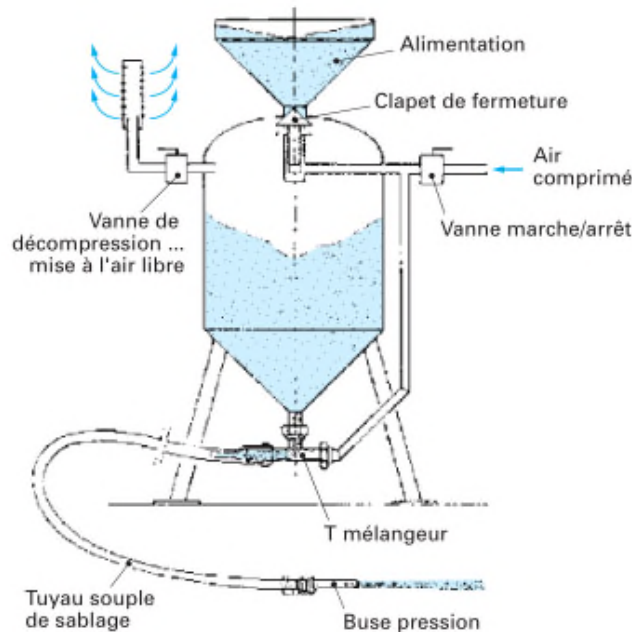


Figure I.5: Projection par air comprimé : système à dépression[7]

- **A pression (surpression)**

Le projectile est éjecté à grande vitesse à travers une buse de projection ou il est amené par pression. Le réglage de l'air comprimé permet le contrôle de la vitesse d'éjection. Longueur 60 à 100 mm, diamètre intérieur 4 à 12 mm. Selon le but recherché, elles seront soit cylindriques, soit de type Venturi. Les pressions d'air varient avec la nature du métal à décaper et le type de grenaille utilisé, (figure I.6).



**Figure I.6:** Projection par air comprimé système à pression[7]

- **A dépression par gravité**

Les projectiles sont en position haute par rapport au pistolet afin de pouvoir alimenter par gravité le pistolet. Le mode d'aspiration est le même que celui du système à dépression. [6]

## I.1.2 Sablage

Le sablage est une technique industrielle de nettoyage des surfaces en utilisant un abrasif(sable) projeté à grande vitesse à l'aide d'air comprimé au travers d'une buse, sur le matériau à décaper. Le sablage est utilisé dans de nombreuses industries. [6]

### I.1.2.1 Principe

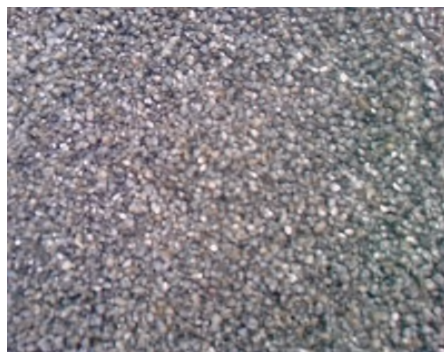
Comme le grenailage, la projection de sable à grande vitesse sur une surface a plusieurs effets :

- il décape, désoxyde, enlève une couche superficielle fragile (peinture par exemple) ;
- il crée une rugosité, qui facilite l'accrochage d'un revêtement, ou donne un aspect à un moule pour pièces en plastique, c'est une bonne préparation avant peinture.
- il dépolit, notamment le verre, aspect "verre sablé".
- utilisé pour le gravage (numéros de série sur les vitres de voitures, noms sur les pierres tombales).
- Lorsque l'abrasif est rond, type billes de verre, on obtient un effet satiné. Utilisé comme finition pour les soudures inox ou aluminium. C'est alors appelé microbillage.
- A fortes puissances les impacts provoquent une déformation plastique et modifient donc la surface (écrouissage, création de contraintes de compression) ;
- A faible puissances avec des abrasifs de gommage, on peut nettoyer sans abimer le support. (Ex : retirer de la peinture d'une vitre sans la dépolir ou la rayer). [4]

### I.1.2.2 Choix du matériau abrasifs

Le choix de l'abrasif à projeter, est selon le but recherché. Le terme sablage vient du fait qu'à l'origine on utilisait du sable comme abrasif : anciennement en frottant la pièce avec, puis en le projetant sur la pièce. Parfois de l'eau est ajoutée au sable, principalement dans le but de limiter la production de poussières.

Le sable n'est presque plus utilisé dans le sablage, à cause de la silice libre qui est hautement cancérigène. On utilise en sablage des scories vitriées, du corindon et d'autres types de produits plus techniques en fonction de ce que l'on recherche à obtenir.



**Figure I.7** : abrasif en fibre de verre

### I.1.2.3 Sableuse

Le traitement de petites et moyennes pièces peut se faire en cabine à manche, cette solution permet de travailler confortablement en confinant dans la machine l'abrasif et les poussières générées. La cabine peut être équipée d'une installation de

recyclage et de nettoyage de l'abrasif en continu. Les sableuses peuvent être munies de bandes transporteuses ou équipée pour le traitement des pièces en automatique.

Le traitement des pièces de grande taille se fait à jet libre, le sableur porte alors une combinaison de protection et un casque ventilé pour le protéger des poussières générées.

Cette opération s'effectue par deux types de machines :

- Machine automatique modèle AOB 32636 (figure I.8).
- Machine manuelle (figure I.9).



**Figure I.8** : sableuse automatique modèle AOB 32636 (STT)



**Figure I.9** : Sableuse manuelle (STT)

Il existe plusieurs technologies de projection d'abrasif :

- Le système à dépression, simple et économique, un venturi, à air comprimé, intégré au pistolet aspire l'abrasif depuis son réservoir.



- Le système à surpression, beaucoup plus productif, consiste à mettre sous pression d'air un récipient dans lequel est stocké l'abrasif, celui-ci est alors expulsé via un flexible et une buse. [4]

### I.1.3 Condition de réalisation des traitements mécaniques

Afin d'assurer la reproductibilité et la qualité d'un traitement mécanique, il s'avère indispensable de figer selon le type de machine utilisée les paramètres suivants :

- Le type de projectile,
- Le milieu (sec, humide),
- La granulométrie des projectiles,
- Le taux de recouvrement,
- Le nombre de buses,
- Le diamètre des buses,
- L'angle de projection,
- La distance buse /pièce,
- La vitesse de rotation de la turbine,
- La distance pièce/ turbine.[6]

## I.2 Procédés de traitements par transformation structurale par voie thermique

### I.2.1 Chauffage superficiel

Le chauffage est localisé jusqu'à quelques millimètres à température austénitique suivie d'un refroidissement rapide sous 2 formes différentes :

- utilisation d'un fluide pour les fortes épaisseurs
- refroidissement endogène (profite du volume intérieur et du milieu extérieur froid pour refroidir la fine couche traité).

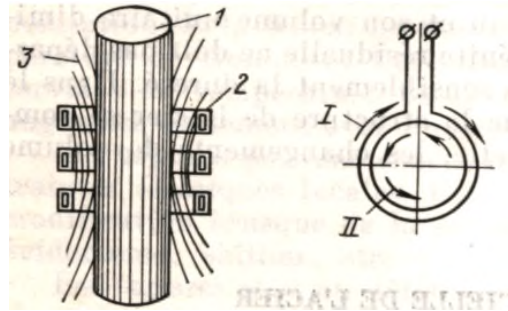
Chauffage oxyacétylène (OA), Réalisé avec un chalumeau

- vitesse de chauffe élevé (200°/s)
- temps de maintien faible
- température et épaisseur difficile à maîtriser. [8]

### I.2.2 Trempe superficielle de l'acier

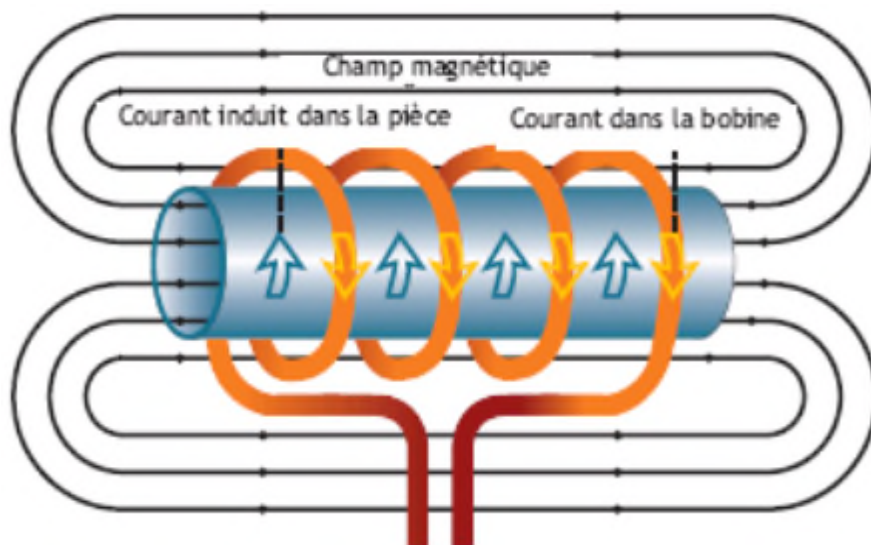
La trempe superficielles est un traitement local qui ne trempe qu'une mince couche superficielle tout en laissant intacte la couche sous-jacent. Les avantages essentiels que présente la trempe superficielle sont l'augmentation de la dureté, l'amélioration de tenue à l'usure, de la résistance, de la limite de fatigue des couches

superficielles de l'acier. Le cœur de l'acier reste ductile et résiste bien aux charges dynamiques. Il est fréquent qu'en pratique la trempe superficielle s'effectue par chauffage aux courants de haute fréquence (par induction), (figure I.10) [8]. Le générateur d'induction envoie un courant alternatif à travers une bobine d'induction, ce qui génère un champ électromagnétique. Ce champ induit des courants dans les matériaux conducteurs comme l'air. En raison de la résistance de l'acier, ces courants sont transformés en chaleur par induction. La chaleur est générée en dessous du revêtement ce qui entraîne un décollement rapide et propre de celui-ci (figure I.11).



1 : pièce ; 2 : inducteur ; 3 : champ magnétique ; I : direction de courant dans l'inducteur ; II : ibidem dans la pièce.

**Figure I.10** : schématisation de chauffage aux courants de haute fréquence [8]



**Figure I.11**: Principe du chauffage par induction

## I.2.3 Procédé par soudage

### I.2.3.1 la soudure

La soudure est un processus de jointure dans lequel les pièces à joindre sont chauffé au-dessus de leur température de fusion. Le lien entre les deux pièces est métallurgique. Les pièces fondues peuvent être jointes avec un métal de remplissage

également fondu dans le processus de jointure, ou sans métal de remplissage (soudure autogène). La soudure de limite s'applique également au thermoplastique, qui peut être chauffé, fondu et fusionné, typiquement en comprimant les deux extrémités de chauffage.

La soudure s'applique à un processus de jointure dans lequel un métal de remplissage est fondu à une température au-dessus de  $448\text{c}^{\circ}$  ( $840^{\circ}\text{F}$ ) mais généralement au-dessous de la température de fonte des pièces à joindre. Le métal de remplissage fondu est déposé à la jonction entre les deux pièces pleines. Le lien est constitué par diffusion de soudent le métal dans les pièces étant jointes. La soudure est semblable à la soudure, mais le métal de remplissage (soudure) fond à une température au-dessous de  $448\text{c}^{\circ}$ .

Il y a plusieurs procédés de soudure : soudure à l'arc électrique, soudage par résistance, soudure instantanée, soudure de torche oxyacétylénique, soudage par friction, électron ou soudure à rayon laser [Weisman]. Principe des différents procédés est présenté sur la figure suivant. [9]



Copie interdite

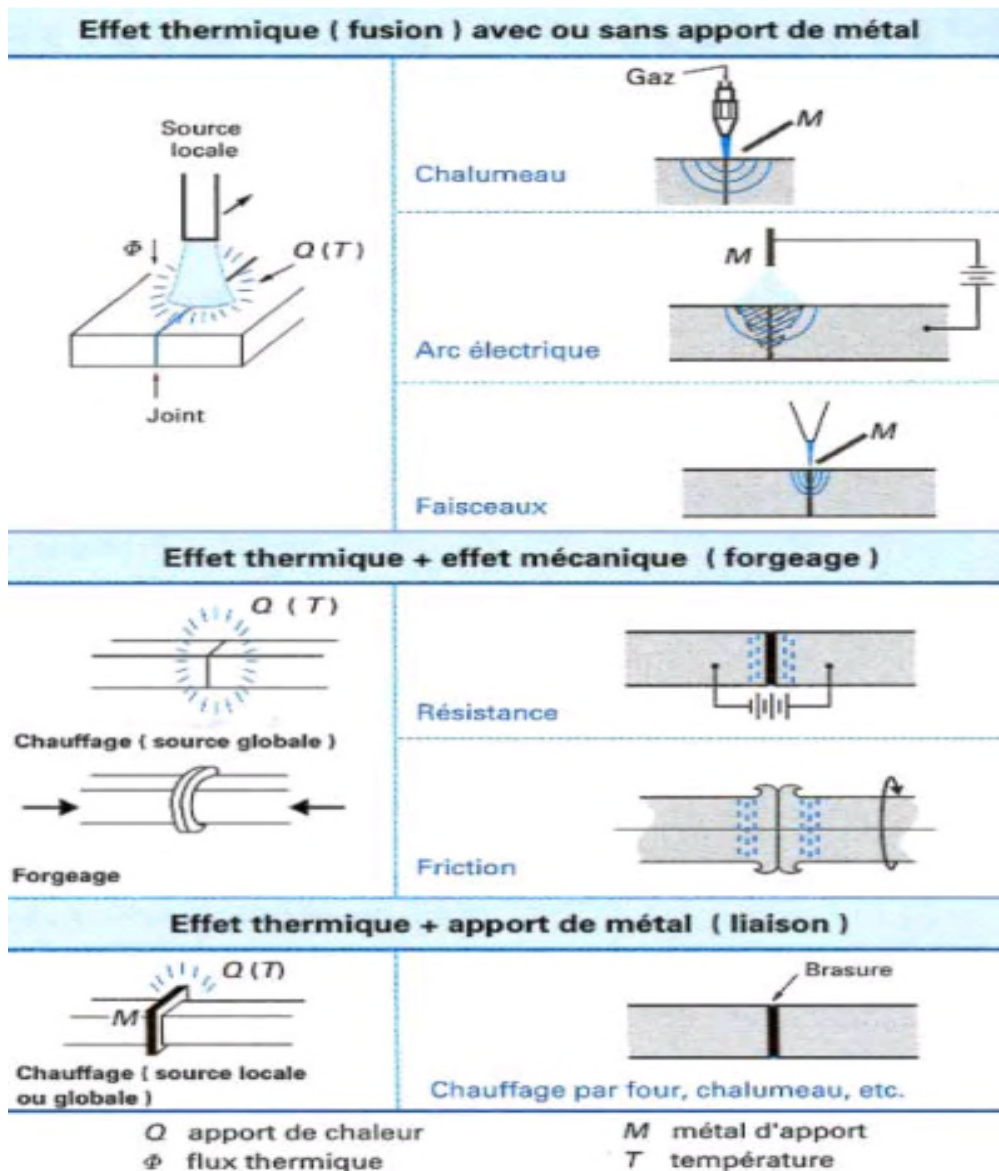


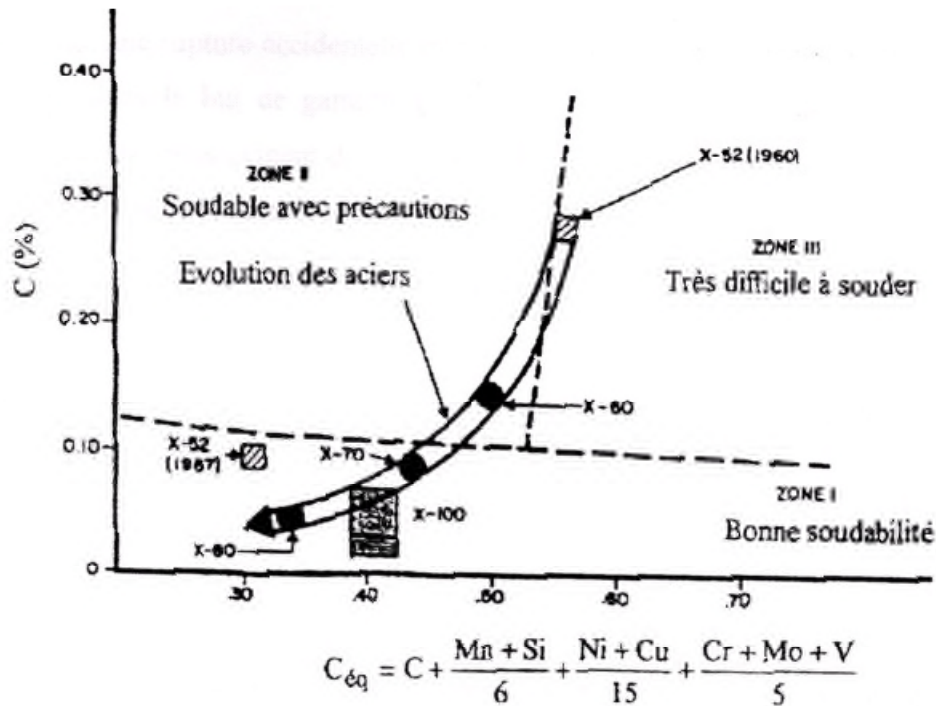
Figure I.12: Schémas de principe des différents procédés[10]

### I.2.3.2 Soudabilité des aciers

Compte tenu du procédé de fabrication d'un gazoduc, les propriétés de soudabilité de l'acier sont très importantes. Elles seront meilleures si la teneur en carbone est faible. Le rôle autres éléments d'alliages n'est cependant pas négligeable.

$$C_{\text{éq}} = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$$

Les propriétés de soudabilité sont meilleures si ce paramètre  $C_{\text{éq}}$  est plus faible. Ceci explique l'évolution des aciers pour tubes, constaté au cours des 40 dernières années est et présentée dans un diagramme(C,  $C_{\text{éq}}$ ), (figure : I.13). Aujourd'hui la plupart des aciers utilisés pour fabriquer des tubes ont une teneur en carbone de l'ordre de 0.05%. [11]



**Figure I.13:** évolution des compositions des aciers pour tubes en fonction de la soudabilité [11]

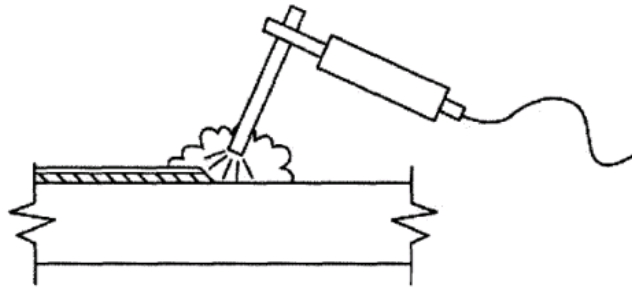
Dans le cas des pipelines, deux exigences techniques et économiques influencent le soudage :

- Remplir les normes de qualité et de sécurité (exigences des utilisateurs et codes de construction) ;
- Coût et durée de l'opération (productivité de pose).

### I.2.3.3 Procédés de la soudure

#### a- Soudure à l'arc électrique protégée en métal

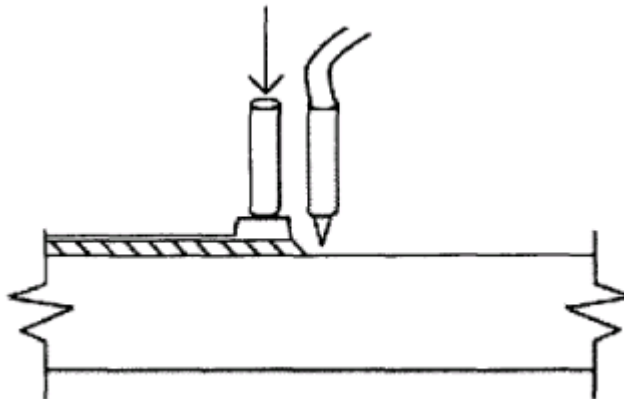
La soudure à l'arc électrique protégée en métal (SMAW : Shielded Metal Arc Welding) désigné également sous le nom de la soudure à l'arc électrique manuelle en métal (MMAW) ou de la soudure de bâton, (figure : I.14). L'électrode consommable est couverte de gaine métallique (flux) qui stabilise l'arc et produit les gaz qui protègent l'arc contre la contamination par l'atmosphère.



**Figure I.14** : illustration de la soudure à l'arc électrique protégée en métal[9]

### b- Soudure à l'arc électrique submergée

Dans la soudure à l'arc électrique submergée (SAW :submerged Arc Welding), l'arc entre l'électrode nue sans interruption alimentée en métal et le morceau de travail est submergé par le dépôt du flux granulaire fondu, qui protège l'arc de l'atmosphère, (figure I.15). L'électrode elle-même ou un servit additionnel de baguette de soudage de métal de remplissage. Le flux protège l'arc et le bain en fusion de l'atmosphère et réduit le taux de refroidissement.

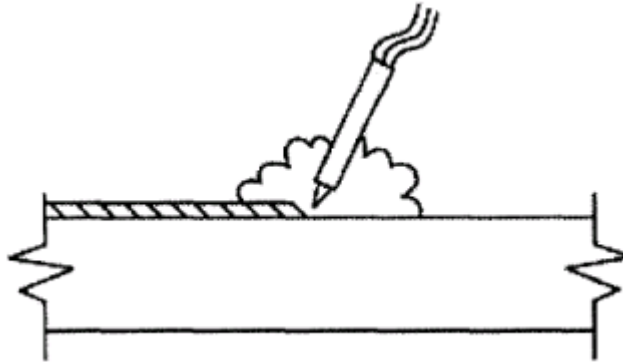


**Figure I.15** : illustration de la soudure à l'arc électrique submergée[9]

### c- Soudage à l'arc sous gaz avec fil électrode fusible

Le soudage à l'arc sous gaz avec fil électrode fusible (GMAW :GasMetal Arc Welding), s'appelle également Métal le soudage sous gaz inerte (MIG :MetalInertGas) une fois protégé par un gaz inerte tel que l'hélium, et Métal le soudage à gaz actif (MAG :Metal Active Gas) une fois protégé par un gaz réactif tel que  $\text{CO}_2$  (figure I.16). L'électrode est consommable, varie de 20 milles à 3/32 " diamètre, et est alimentée par le centre d'un bec de gaz (bouts de torche) ce assure sans interruption un gaz de

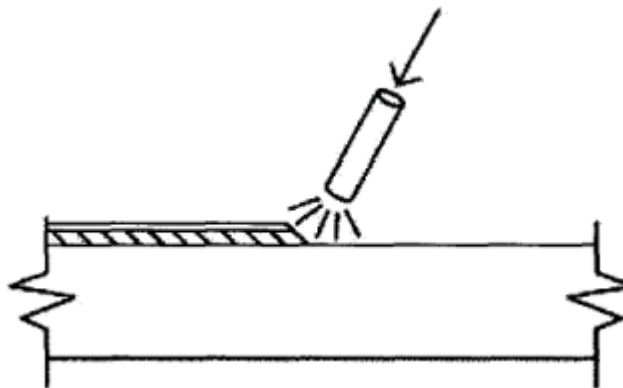
armature tel que l'argon, l'hélium ou l'anhydride carbonique. Elle est la plupart du temps employée avec l'alimentation à courant continu.



**Figure I.16** :illustration du soudage à l'arc sous gaz avec fil électrode fusible[9]

#### d- Soudure à l'arc électrique de noyau de flux

Dans la soudure à l'arc électrique de noyau de flux (FCAW :Flux Core Arc Welding), l'électrode est consommable et contient à son centre l'un ou l'autre un flux qui protège automatiquement le bain en fusion (individuellement protégé FCAW), ou des minerais ou des alliages, dans ce cas l'armature de gaz est nécessaire (FCAW protégé du gaz), la figure I.17.

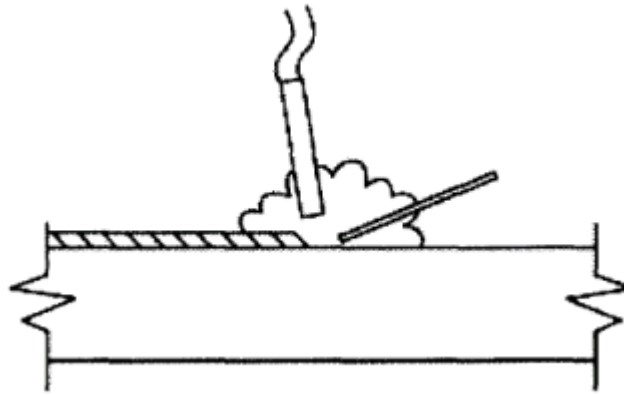


**Figure I.17** :illustration de la soudure à l'arc électrique de noyau de flux[9]

#### e- Soudure d'arc à tungstène de gaz

La soudure d'arc à tungstène de gaz (GTAW) s'appelle également Tungstène le soudage sous gaz inerte (TIG). L'électrode non-consommable est faite de tungstène (tungstène pur, tungstène de zirconium, ou tungstène thorium) et est contenue au centre d'un gaz bec, (figure I.18). La soudure peut être autogène (aucun métal de remplissage) ou une baguette de soudage séparée peut être utilisée pour fournir le métal de remplissage. La piscine d'arc et de soudure sont protégées par le gaz inerte

(l'argon ou hélium de catégorie de soudure). Sur l'acier du carbone, le TIG est habituellement limité pour amincir la pipe ou la tuyauterie de mur, et le passage s'enracinent et chauds (les deux premiers passages) sur la pipe de taille standard.



**Figure I.18** :illustration de la soudure d'arc à tungstène de gaz[9]

#### I.2.3.4 Paramètres de soudure

La qualité d'une soudure dépendra du choix du procédé de soudure, des qualifications de la soudeuse et des paramètres de soudure, qui incluent : la conception de joint de soudure, la position de soudure, le montage, le support de soudure, la composition du métal de remplissage et le flux, type d'électrode, diamètre d'électrode, le courant de soudure, longueur d'arc (électrode-travailler l'espace), vitesse de voyage, technique de soudure (armure oscillante ou lisse droite, arc commençant et s'arrêtant), tension d'arc, protégeant l'écoulement de gaz, préchauffent, inter-passent le contrôle de température, et poteau-soudent le traitement thermique.[9]

#### I.2.3.5 Soudure mécanisée

La soudure mécanisée (automatique ou semi-automatique) est utilisée généralement pour la soudure réitérée de la pipe de grand diamètre, comme dans le cas du pétrole ou les gazoducs. On rapporte que cinq soudures de passage en 36 " diamètres, 0.5 " canalisation de mur sont accomplies trois fois plus rapidement avec la soudure mécanisée qu'avec la soudure manuelle de bâton (figure I.19). [9]

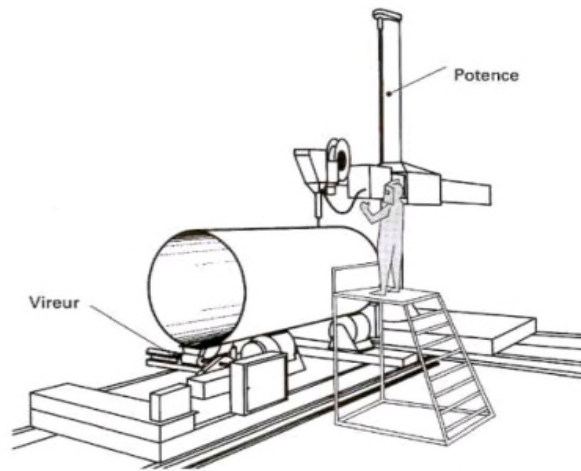


Figure I.19 : vireur et potence de soudage mécanique

### I.2.4 Projection thermique

- Rechargement métallique par Projection thermique
- Phase vapeur: dépôt physique PVD et dépôt chimique CVD
- Faisceaux énergétiques
- Application de feuilles métalliques: Dorure, argenture, cuivrage à la feuille. [12]

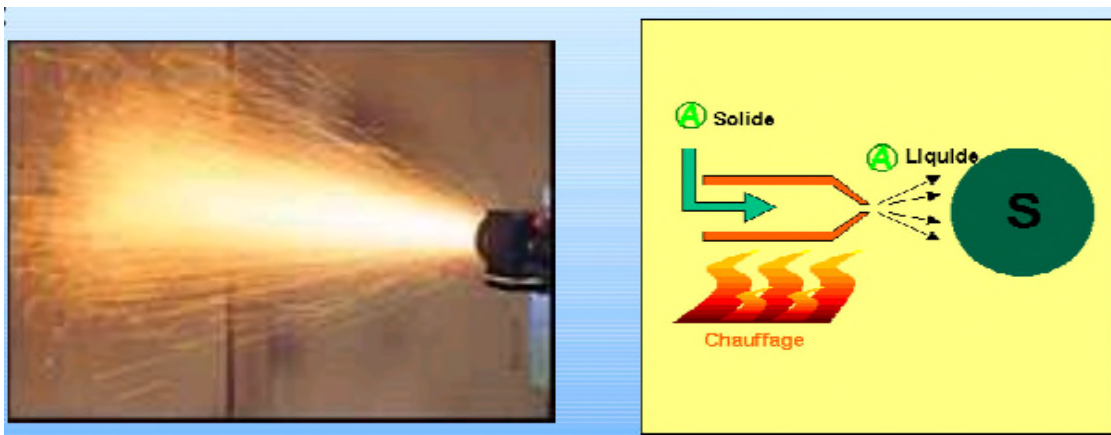


Figure I.20: principe de la projection thermique

## I.3 Procédés de traitements par transformation structurale par voie chimique

### I.3.1 Par diffusion

Sont la diffusion d'éléments qui enrichissent localement la surface du substrat et, souvent mais pas toujours, engendrent la précipitation d'une couche de composé défini. En phase solide, on peut faire diffuser des métaux ou des metalloïdes (boruration, chromisation, vanadisation, siliciurisation, aluminisation,...). En phase liquide, on peut faire diffuser des métaux (Cr, V, Ti, Nb), mais aussi du carbone

(carburation, cémentation), de l'azote (nitruration) ou du soufre (sulfuration), ou des combinaisons de ces éléments. En phase gazeuse, on peut également procéder à des carburations ou à des nitrurations, éventuellement en activant le procédé par plasma.[13]

### I.3.2 Par revêtement

#### a. Les revêtements par voie chimique

Sont obtenus à partir d'une solution dans laquelle l'espèce à déposer, sous forme ionique, subit une réduction sans apport de courant. La réaction se fait soit par déplacement, cas du substrat moins noble que le métal à déposer, soit par l'intervention d'une espèce tierce, un sel dissous, qui s'oxyde. L'exemple le plus connu est celui des dépôts dits de "nickel chimique".

#### b. Revêtements par voie électrolytique

L'apport est également sous forme ionique, mais le dépôt nécessite une source de courant. Le substrat est placé à la cathode. On parle de nickelage ou de zingage « électrolytiques » pour les dépôts métalliques. Des dépôts organiques ou céramiques sont également possibles, on parle alors de peinture ou d'émaillage par anacataphorèse. [13]

### I.3.3 Principales opérations de préparation de surface

Avant faire un traitement par transformation structurelle par voie chimique on fait des opérations dit opérations de préparation de surface (dégraissage, décapage, polissage, dégazage,...)

#### I.3.2.1 Dégraissage

Ce que l'on cherche à éliminer dans cette opération, ce sont des graisses animales, végétales ou minérales ainsi que leurs produits de dégradation et toutes les souillures qu'elles retiennent. Le dégraissage s'effectue soit par dissolution en milieu de solvants organiques, soit par saponification (donc en milieu alcalin), soit par émulsification à l'aide d'un tensioactif. Dans la plupart des cas, on aura recours à une élévation de température suffisante pour ramollir la souillure grasse. De même un effet mécanique (jets, brosses, ultrasons, bulles de gaz émis par électrolyse) est souvent nécessaire. Suivant les besoins, le dégraissage sera plus ou moins profond. Pour un dégraissage très poussé, il convient de faire suivre le dégraissage chimique d'un dégraissage électrolytique (dont l'action ne saurait se résumer à l'action des bulles).



### I.3.3.2 Décapage (décalaminage, dérouillage, dérochage)

Le nom générique de décapage regroupe les procédés éliminant les produits solides adhérents au métal (oxydes, sable de la « peau de fonderie »). Pour le fer et l'acier, le décalaminage élimine les couches d'oxydes anhydres formées à hautes températures, alors que le dérouillage concerne les oxydes hydratés de la corrosion naturelle. En effet, dans les ateliers, on utilise souvent un vocabulaire légèrement « décalé » par rapport à la langue et la réalité technique, notamment en matière de décapage, avec des termes comme décalaminage, dérochage, désoxydation, etc. Les méthodes de décapage sont chimiques, électrochimiques, mécaniques ou thermiques. Les méthodes chimiques et électrochimiques utilisent des solutions agressives acides ou alcalines, ou encore des oxydants forts.

### I.3.3.3 Ébavurage, polissage, brillantage, satinage

Ces opérations sont destinées à éliminer les imperfections géométriques et à maîtriser l'aspect de la surface. Celle-ci sera aplanie par abrasion, par écrasement des parties saillantes, par dissolution chimique ou électrochimique.

### I.3.3.4 Démétallisation

La démétallisation s'applique soit à des pièces « refusées », soit à du métal provenant d'une opération intermédiaire (masquage, traçage...). Cette opération, le plus souvent chimique, est spécifique du métal à éliminer.

### I.3.3.5 Dégazage

Les métaux peuvent retenir des gaz aussi bien par adsorption superficielle que par dissolution dans leur masse. Ces gaz sont susceptibles de se dégager lors d'un traitement sous vide ou à tout autre moment entraînant le décollement d'un revêtement. Par ailleurs, l'hydrogène détériore les propriétés mécaniques des aciers. Les dégazages se font par étuvage, la température et la durée dépendant du matériau.

### I.3.3.6 Lavage, rinçage, égouttage, séchage

Les lavages éliminent les éléments solubles ou les particules peu adhérentes de la surface. Après un traitement en phase liquide, les rinçages arrêtent la réaction et évitent le transfert de matière dans les étapes suivantes. La concentration résiduelle du produit à diluer dans l'eau de rinçage est insuffisante pour évaluer la qualité d'un rinçage du point de vue préparation de surface ; ce qui importe ici, c'est la quantité de sels restant piégés par capillarité (plis de soudage, trous borgnes), ceux-ci, après séchage atteindront localement la saturation et pourront provoquer beaucoup de dommages (ce qui implique que l'eau de rinçage elle-même ne soit pas un vecteur



d'impuretés). Il importe que la dernière eau que reçoit une pièce à la sortie d'un rinçage soit l'eau propre de renouvellement.

Les opérations de lavages des copeaux entre deux usinages et le dépoussiérage par soufflage après un ponçage mécanique relèvent du même esprit.

Certaines opérations de revêtement exigent un support sec. Le séchage s'effectue le plus souvent à chaud.

Nous remarquerons que les premières couches d'eau liées au métal ne sont pas facilement éliminables même à des températures bien supérieures à 100 °C et qu'elles influencent de nombreuses propriétés superficielles dont les tensions interfaciales. [14]

### I.4 Contrainte résiduels

Pour tous les traitements de surface normalement réalisés, on introduit des contraintes résiduelles de compression. La distribution des contraintes dépend des conditions de réalisation du traitement et de l'état initial des contraintes résiduelles. On définit généralement les contraintes résiduelles comme étant les contraintes qui subsistent dans les pièces mécaniques qui ne sont soumises à aucun effort extérieur. Ces contraintes sont en équilibre sur l'ensemble du volume que constitue un composant ou une structure mécanique, figure I.21.

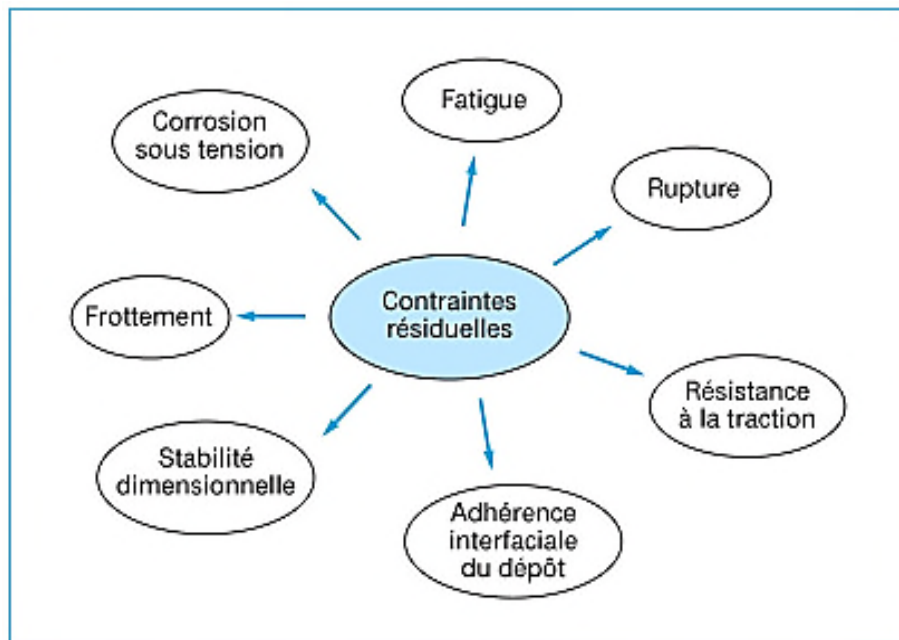
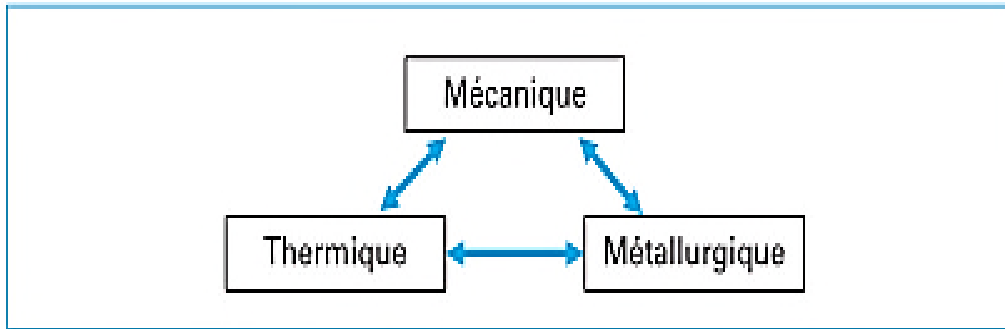


Figure I.21 :Effets des contraintes résiduelles sur les performances des matériaux[15]

Les origines des contraintes résiduelles sont très diverses. Elles peuvent être séparées en trois catégories mécaniques, thermique et métallurgique (figure I.22).



**Figure I.22:** origines des contraintes résiduelles

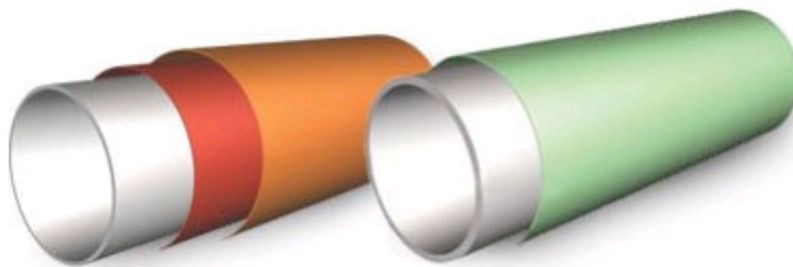
## I.5 Revêtement des tubes

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

### I.5.1 Revêtements extérieurs

#### I.5.1.1 Revêtement Fusion Bonded Epoxy (FBE)

Les revêtements FBE constituent des couches de résine durcissant thermoplastiques, qui sont apposées par un procédé thermostatique sur les tubes d'acier et les protègent de la corrosion. Le FBE peut être utilisé à des températures d'exploitation allant jusqu'à 110 degrés C, l'épaisseur typique est comprise entre 350 et 450 micromètres. Une deuxième couche entraîne une excellente résistance aux détériorations du pipeline, même dans les conditions environnementales les plus difficiles, figure I.23.



**Figure I.23 :** Revêtement FBE

### I.5.1.2 Revêtement extérieur polyoléfine 3 couches

Le revêtement polyoléfine 3 couches est une combinaison de résine thermoplastique durcissant, de couche d'adhérence copolymère et de thermoplastique apposée sur les tubes d'acier afin de garantir leur protection contre la corrosion et les détériorations mécaniques, figure I.24.[16]

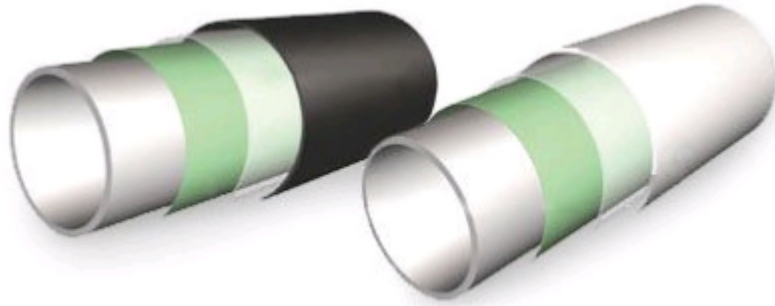


Figure I.24: Revêtement extérieur[16]

### I.5.2. Revêtements intérieurs

#### Revêtements pour l'amélioration du débit

Une résine époxy liquide est pulvérisée sur la paroi interne des tubes dans une épaisseur typique de 60 à 100 micromètres. Il en résulte une amélioration de la capacité de transport du gaz, une minimisation des résistances de friction et donc une réduction des stations de compresseurs. La simplification du nettoyage et la protection temporaire contre la corrosion font du revêtement Flow Coating une solution unique et économique pour le transport du gaz.

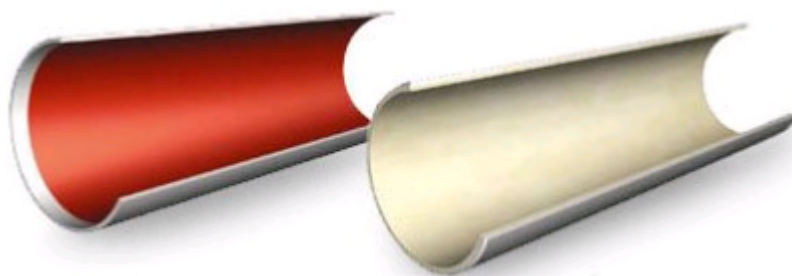


Figure I.25 : Revêtements en résine époxy liquide pour les pipelines d'eau [16]

Une résine époxy liquide est pulvérisée sur la paroi interne des tubes dans une épaisseur de 400 à 500 micromètres. Pour ce faire, nous utilisons une nouvelle génération de résines époxy sans solvants.

Un objectif permanent de l'exploitation des pipelines est d'assurer des transports massifs d'hydrocarbures dans le respect de l'Environnement et de la Sécurité. Cet objectif est atteint par la mise en œuvre de plan de surveillance et de maintenance qui est destiné à maintenir l'intégrité des lignes et éviter toute perte de confinement. La présentation expose les risques auxquels sont soumis les pipelines et les mesures qui sont mises en œuvre pour y répondre.[16]

## I.6 Caractéristiques des résines PU

Selon les normes exigées, nous évoquerons les caractéristiques de performance des résines PU (polyuréthanes) en tant que revêtement des structures enterrées. Les caractéristiques particulièrement la haute adhérence obtenue doit être précédée comme pour tout autre revêtement par une préparation convenable de l'état de surface qui sera défini quantitativement par son degré de rugosité, c'est-à-dire par la mesure de la profondeur maximale des aspérités de la surface obtenue après élimination des composés indésirables et des impuretés de surface: rouille pulvérulente, calamine, graisse, huile, peinture, humidité, boues, poussières... Les méthodes de préparation de l'état de surface sont de deux types : traitements mécaniques de surface: grattage, brossage, sablage, grenailage et décapage et traitements chimiques par utilisation des solvants et des détergents chimiques. Les propriétés de réactivité de la surface de l'acier avec un sol environnant en plus de l'agressivité corrosive du sol dépendra de l'état de surface qui est défini selon des considérations structurales, géométriques, mécaniques ou encore physiques ou chimiques. Le tableau I.1 donne les aspects de ces considérations.[12]

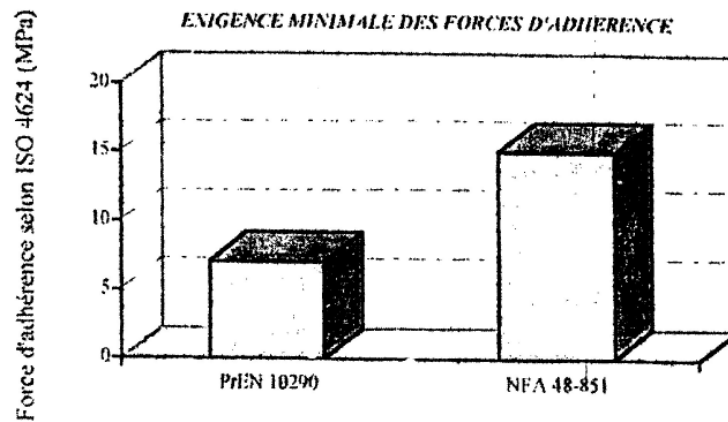
**Tableau I.1** Caractéristiques de l'état de surface

Etats de surface	caractéristiques
Microstructure	Texture, hétérogénéité
Géométrie	Rugosité, profil
Mécanique	Dureté, écrouissage, frottement
Physico-chimique	Composition, couche
chimique	Réactivité, surtension

### I.6.1 Adhérence

L'efficacité de la protection de la surface d'acier n'est pas seulement liée à la qualité intrinsèque du revêtement, mais à l'adhérence du revêtement qui est une caractéristique de premier ordre afin d'éviter toute infiltration en service de l'eau ou de tout autre électrolyte se trouvant dans le sol. Le subjectile à revêtir doit être sec et exempt de tout composé indésirable, avec une rugosité qui favorise l'accrochage du revêtement. Si les conditions de préparation de surface sont respectées, les résines PU

peuvent conduire à des valeurs d'adhérence supérieures à 10 Mpa. La figure I.26 indique les exigences minimales demandées dans certaines normes.



**Figure I.26** Exigences minimales des forces d'adhérence selon quelques normes[12]

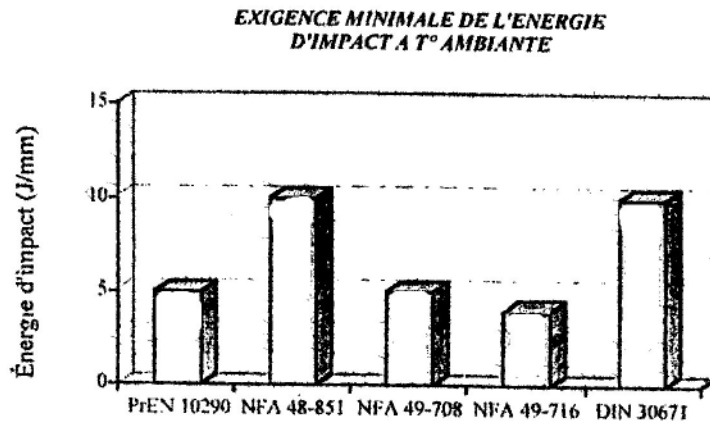
### I.6.2 Résistance au choc

La résistance aux contraintes mécaniques tel que le choc doit être élevée. Lors du transport, le stockage et la pose de pipe, le choc peut entraîner la détérioration du revêtement et donc la mise à nu du métal. La protection anticorrosion est alors menacée. Cette caractéristique présente de l'importance en pratique car les revêtements sont soumis lors de la pose, à des agressions mécaniques de poinçonnement par des objets durs ou par des pierres qui sont très sévères lorsque ces objets présentent des arêtes vives.

Les matériaux thermodurcissables sont très sensibles aux chocs parce qu'ils correspondent à des matériaux durs. Les résines PU peuvent réaliser un compromis entre dureté et élasticité. La résistance au choc est déterminée en lâchant d'une certaine hauteur, un poinçon métallique calibré sur le revêtement et d'exprimer l'énergie d'impact maximale pour laquelle le revêtement n'est pas détérioré. Il existe plusieurs normes traitant ce test, notamment ISO 6272, ASTM G14, NF A 49 – 716, PrEN 10290... La figure I.27 indique les exigences minimales de certaines normes pour la résistance aux chocs.

Les résultats d'essais sont donnés sous la forme de profondeur de pénétration du poinçonnement sous l'action d'un effort donné.

Les revêtements thermodurcissables ont un comportement satisfaisant grâce à leur dureté élevée. Selon la norme PrEN 10290, le poinçonnement s'effectue par pression de  $10 \text{ N/mm}^2$  à partir d'un poinçon de 1.8 mm de diamètre. La pression est maintenue 24 h à  $23^\circ\text{C}$ ; la profondeur de pénétration ne doit pas dépasser  $200 \mu\text{m}$ .



**Figure I.27** Exigences minimales de l'énergie d'impact à température de 25°C selon quelques normes

Les essais de résistance au choc sur résine PU ont montrés des valeurs beaucoup plus faibles que ceux prévus par les normes, de l'ordre de 20 fois moins. Ce qui montre que les résines PU étant un matériau très dur peut résister convenablement aux contraintes mécaniques.[12]

### I.6.3 Résistance à l'humidité

Le revêtement doit être inerte chimiquement et assurer un effet barrière contre l'humidité contenue dans les sols qui selon sa composition peuvent avoir un caractère acide ou basique. La protection anticorrosion est de conserver la liaison adhésive à l'interface métal / revêtement. Les tests de résistance à l'humidité consistent à immerger le revêtement dans un milieu corrosif et de vérifier qu'il n'absorbe peu de liquide et ne subit pas de dégradation selon des mécanismes d'hydrolyse d'une part et d'autre part à ce que le revêtement en application sur un support d'acier de pipelines, après immersion conserve suffisamment d'adhérence.

La norme NFE 86 -900 pour simuler l'agressivité des sols, inclut un test qui consiste à immerger pendant 6 mois des éprouvettes revêtues dans des solutions aqueuses de carbonate de sodium (pH 8) et d'acide sulfurique ( pH 4) à une température de 23°C ± 2°C. Les éprouvettes, après immersion, sont essuyées proprement et séchées à l'air ambiant avant vérification au peigne électrique. L'exigence demandée est qu'aucun défaut ne doit être constaté.

Des tests de résistance à l'humidité ont été effectués sur des films libres de 1 mm d'épaisseur obtenus à partir de formulations à base de résines PU en modifiant les polyols. Nous avons constatés des différences d'absorption des films immergés dans l'eau déminéralisée et dans une solution d'acide (figure I.28). Les films PU formuler à partir du polyol I conduit à un taux d'absorption important alors que le polyol II est beaucoup plus performant et sera donc apte à assurer un effet barrière contre les

agents corrosifs. On notera que la composition des polyols I et II n'a pas été communiquée pour des raisons de brevet et de commercialisation du produit.[12]

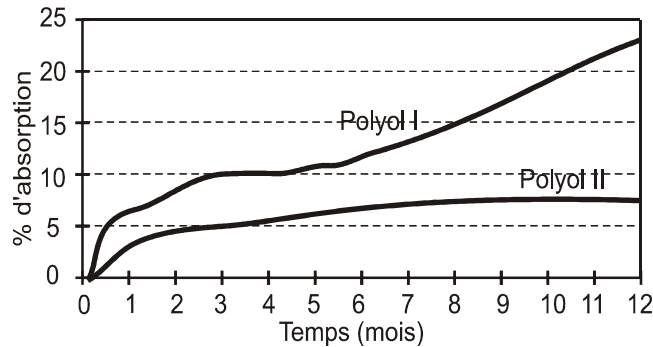


Figure I.28 a

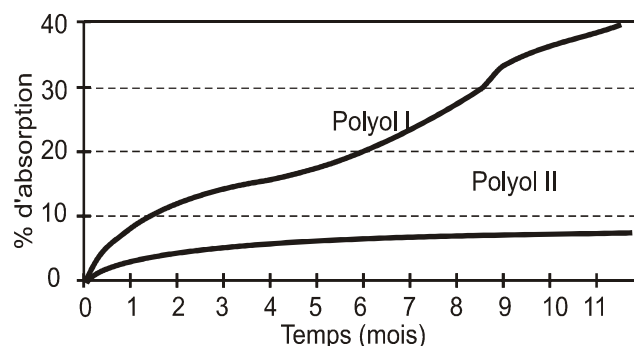


Figure I.28 b

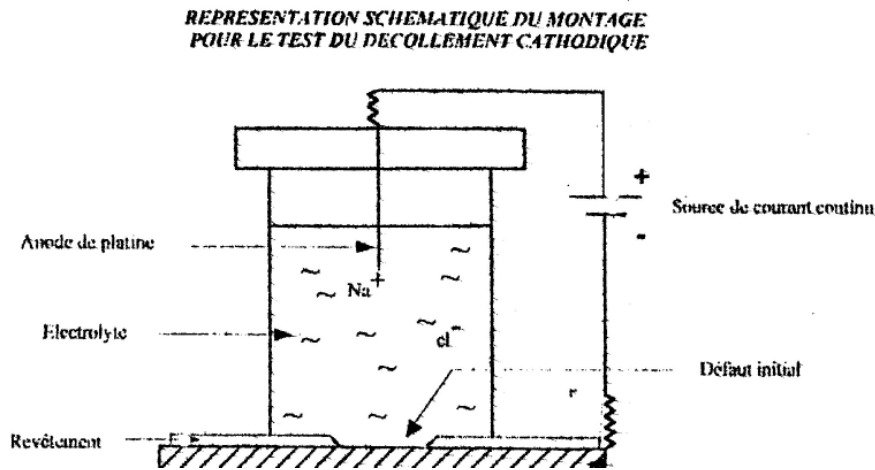
**Figure I.28** Tests d'absorption d'humidité de films libres obtenus à partir de formulations à base de résines PU en modifiant les polyols montrant des différences d'absorption dans l'eau déminéralisée (a) et dans une solution d'acide (b).[12]

#### I.6.4 Résistance au décollement cathodique

La protection cathodique constitue une protection active. Le principe est d'amener l'acier à un potentiel électrostatique suffisamment négatif pour éviter tout développement de réaction d'oxydation et protéger le métal contre la corrosion à l'endroit où le revêtement présente un défaut. En effet, il est impossible d'éviter les détériorations accidentelles du revêtement après sa mise en fouille et ces défaillances sont parfois difficiles à détecter.

Dans le domaine des revêtements des ouvrages enterrés, l'une des sources de dégradation peut provenir de la protection cathodique. Celle – ci, en modifiant la nature chimique du milieu environnant à l'interface entre le métal et le sol environnant a tendance à accélérer la dégradation de la liaison acier / revêtement.

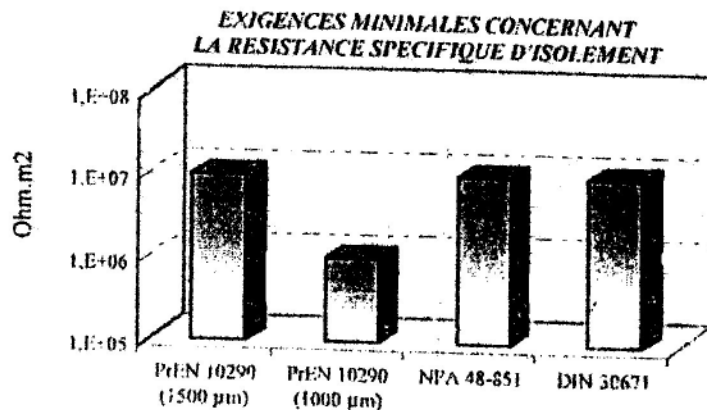
Le montage typique d'un test de décollement cathodique est représenté par la figure I.29.



**Figure I.29 :** Représentation schématique du montage pour le test du décollement cathodique[12]

### I.6.5 Résistance d'isolement

A ces caractéristiques, doit s'ajouter la notion de résistance électrique du revêtement, que l'on appelle couramment la résistance d'isolement, qui a pour vocation d'inhiber le courant de corrosion entre l'acier et l'environnement du sol. C'est l'effet barrière du revêtement qui doit se traduire par une imperméabilité à l'eau, à l'oxygène et aux ions, afin d'éviter toute infiltration atteignant la surface de l'acier. Plus le revêtement absorbe d'éléments conducteurs, tels que l'eau et les ions, plus la résistance d'isolement sera faible. Le suivi de la résistance d'isolement est donc un moyen de contrôler l'efficacité de l'effet barrière du revêtement dans le temps. Les exigences minimales concernant la résistance spécifique d'isolement des résines PU sont illustrées sur la figure I.30.



**Figure I.30:** Représentation schématique des exigences minimales pour le test de la résistance spécifique exprimée en Ohm.m<sup>2</sup> des revêtements en résines PU après 100 jours d'immersion à 23°C dans une solution de NaCl 0.1M/l. [12]



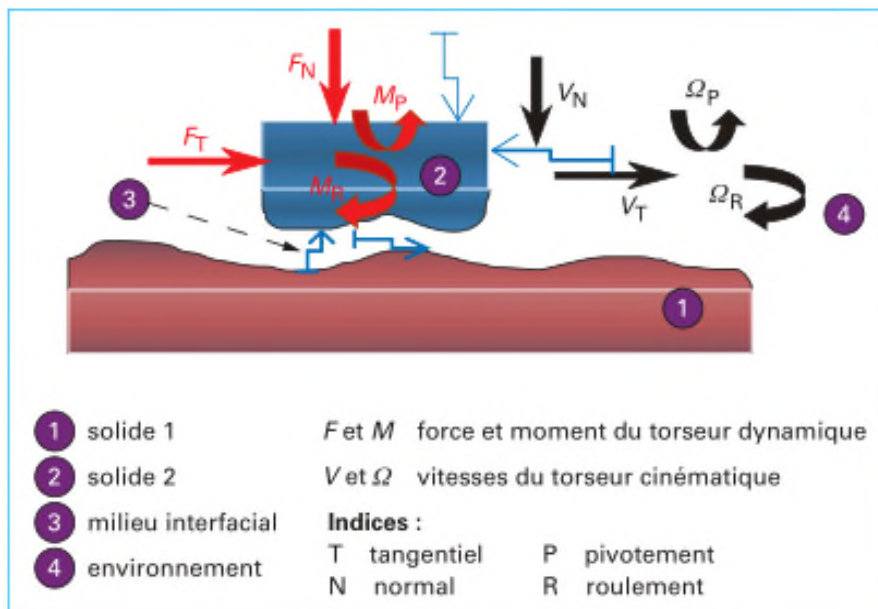
**I.7 Tribologique ou Mécanique de contact**

Les sollicitations tribologiques les plus courantes, sont définies à partir de l'analyse systémique d'un contact. Sous sa forme la plus générale, un contact tribologique, est composé de quatre éléments principaux (figure I.31) :

Les deux corps ou solides **1** et **2** soumis aux torseurs cinématique (regroupant les composantes de vitesses) et dynamique (regroupant les composantes des forces  $F$  et des moments  $M$  appliqués au contact). Ces solides sont limités par des couches superficielles dont les caractéristiques spécifiques macros et micro-géométriques, physicochimiques, mécaniques ou structurales sont souvent mal connues. Ils sont reliés aux solides environnants par des raideurs et des amortissements de liaisons ;

Le milieu interfacial **3** ou 3<sup>ème</sup> corps est soumis à des sollicitations mécaniques, thermiques, physicochimiques. Il participe à l'accommodation du gradient de vitesse entre les deux premiers solides. Sa présence, ses propriétés et son évolution au cours du temps sont déterminantes pour le fonctionnement du contact. Il peut être solide, fluide, introduit intentionnellement dans le contact (lubrifiant par exemple) ou généré dans le contact lors du fonctionnement (films transférés) ;

L'environnement **4** dont le rôle est déterminant dans le comportement en service du contact, par ses capacités lubrifiantes, par sa contribution à la dispersion de l'énergie dissipée dans le contact, par sa réactivité chimique avec les surfaces des solides en contact. [18]



**Figure I.31:** Représentation schématique d'un contact tribologique

**I.8 Procédé de fabrication des tubes**

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

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

**Spécification :**

La présente spécification reprend les pipelines sans soudure et soudés fabriqués suivant deux niveau d'exigences PSL1 / PSL2.

PSL1 limites aux dimensions 10.3 à 2032 mm (0.405 à 80 inches)

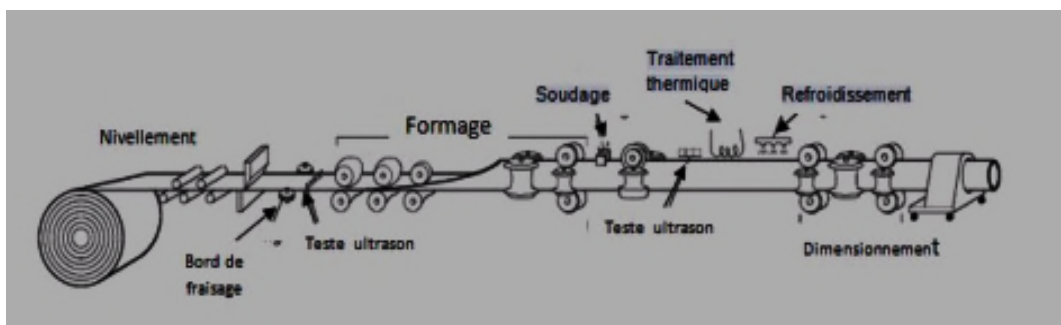
PSL2 limites aux dimensions 114.3 à 2032 mm (4 1/2 à 80 inches)

Les tubes a doubles soudure sont limites aux dimensions 914 mm (36 inches) et plus

Les tubes a soudure en hélice sont limite aux dimensions 114.3 mm (4 1/2 inches) et plus.

**I.8.1 Les tubes soudés sous forme spirale**

Les procédures de fabrication des tubes soudés en spirale sont faites par cintrage de bande de feuilles d'acier de la forme d'un tuyau et la soudure ensemble, cette technique de production passe par des étapes, comme l'indique la figure I.32. Le soudage se produit ici sur la production de tubes en spirale qui sont généralement fournis.



**Figure I.32 :** Technique de fabrication des tubes soudés en spirale[17]

Le formage du tube en spirale se fait avec inclinaison de l'angle d'introduction de la bande qui se calcule par la relation suivante:

$$\beta = \text{Arcsin}\left(\frac{B}{D_{ext} \cdot \pi}\right) \tag{I.1}$$

Avec ; B : la largeur de bande ; D<sub>ext</sub> : diamètre extérieur de tube formé ; β : l'angle d'introduction de la bande par rapport aux axe cimétrique (Δ).

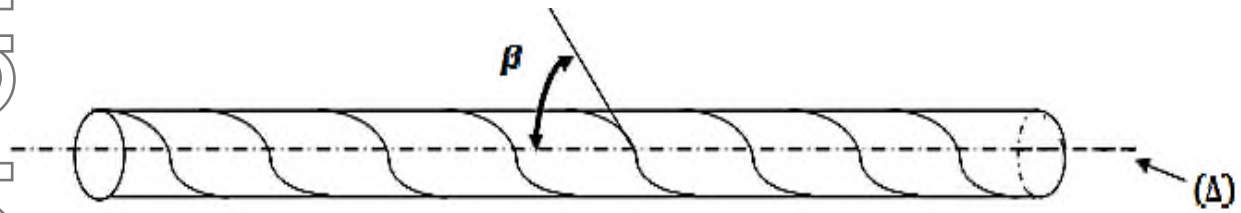


Figure I.33: L'angle d'introduction de la bande[17]



Figure I.34: soudure spirale (STT)

### I.7.2 Les tubes soudés sous forme longitudinale

La technique de fabrication des tubes soudés sous forme longitudinale est généralement formé à froid de la plaque à travers le processus "UOE", elle est spécifique aux tubes avec des diamètres plus que 406.4 mm (16").



Figure I.35: soudure longitudinale(STT)

Cette technique passe par trois étapes de formage :

#### a) Croquage et formage

Cette étape où la plaque va être pliée aux niveaux de l'extrémité, l'objectif de cette opération est de faciliter le processus de pliage par les étapes suivante, à partir de ça la tôle ou la plaque unitaire est pliée en deux types de presse la première confère la plaque sous forme "U" et la seconde lui donne une forme "O" voir la figure I.35: a, b, c.[17]

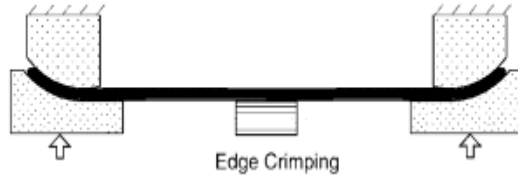


Figure I.35a : croquage

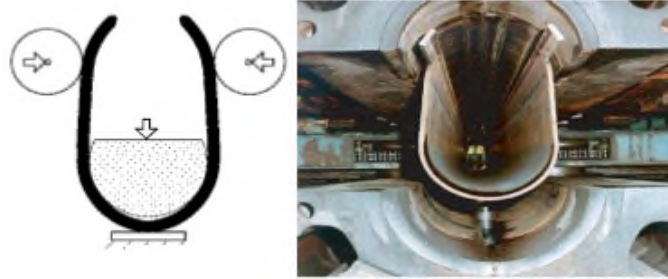


Figure I.35b : Formage sous forme "U"

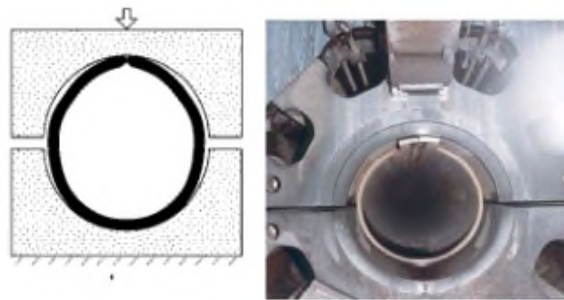


Figure I.35c :Formage sous forme "O"[17]

**b) soudage**

Le soudage dépend ici de la technique de soudage à l'arc sous flux à l'aide de tête soudeuse automatique, les soudures intérieures et extérieures grandissent longitudinalement sur une trajectoire d'une ligne droite, généralement le cordon intérieur est réalisé à la figure suivante :



Figure I.35d : soudage[17]

### c) Expansion et calibrage

L'objectif de cette opération est d'atteindre des tubes de section parfaitement circulaire, l'augmentation des diamètres ici est de plus jusque' à 1.5 au maximum (figure I.35e).

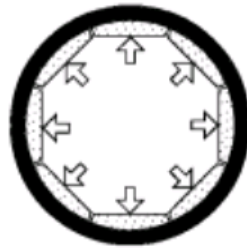


Figure I.35e:Expansion[17]

### I.7.3 Tubes sans soudure

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

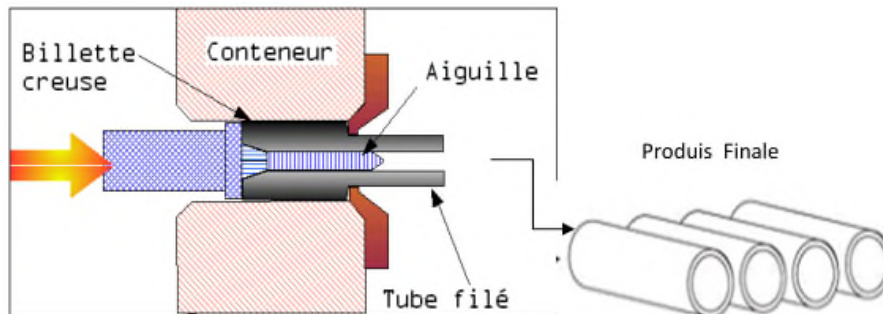


Figure I.36: Fabrication de pipe sans soudure

### I.8 Synthèse bibliographique

Gérard BÉRANGER et Henri MAZILLE (2005), La notion de préparation de surface recouvre, dans la pratique industrielle, un grand nombre de procédés ou gammes de traitement, dont l'objectif est de conférer à la surface traitée soit des propriétés physico-chimiques particulières (composition, propreté inclusionnaire, aspect, mouillabilité, adhérence...), soit des propriétés mécaniques ou géométriques spécifiques (rugosité, contraintes superficielles, caractéristiques tribologiques...).

Le secteur des revêtements et traitements de surface (RTS) subit depuis deux ou trois décennies, une mutation technologique importante, provoquée par de nouvelles

exigences techniques et/ou réglementaires ou par de récents développements industriels. L'importance de ce secteur résulte non seulement de ses vastes domaines d'applications, mais aussi de sa pluridisciplinarité ; celle-ci fait en effet appel à la plupart des domaines scientifiques et technologiques. En permettant de concevoir et de réaliser des objets nouveaux ou en améliorant la durabilité, la qualité et la fiabilité de produits existants, les revêtements et traitements de surface sont générateurs de progrès et, à ce titre, ils doivent être intégrés dans tout processus d'élaboration, dès les premiers stades de la conception dans un projet.[19]

### Conclusion

Au travers de ce chapitre sur les procédés de réparation en maintenance, nous avons présenté les procédés de traitements de surface par transformation structurale par voie mécanique, thermique et chimique des aciers, et les principales opérations de préparation de surface avant le traitement et revêtement de surface.

Après nous avons vu des techniques de revêtement des tubes après le traitement de surface, et les caractéristique de la résine polyuréthane (PU). En fin de ce chapitre en présente les procédés de fabrication des tubes des pipelines, et une synthèse bibliographique concerne les traitements de surface.

Dans le chapitre suivante nous présentent le transport par canalisation degaz naturel et produits pétroliers des installations des gisements de HassiR'mell (HR) et Hassi Messaoud (HM) au sud de l'Algérie vers les ports pétroliers et zones industrielles d'Arzew (AR) et Skikda (SK) au nord, en cas particulier la ligne de gaz GZ1 l'objet de notre projet.

Copie interdite

***CHAPITRE II***  
***CONTEXTE INDUSTRIEL***

## Introduction

Compte tenu de la localisation géographique éloignée des ressources en énergies fossiles pétrole et gaz naturel des centres de consommation, l'acheminement de ces ressources sur des distances transcontinentales s'opère par navigation maritime et par pipelines. D'importants réseaux de pipelines ont été construits depuis les années 60 et se développent toujours.

La société algérienne SONATRACH (SH) possède et exploite un réseau de canalisations évalués à plus de 18 000 Km, a des diamètres allant de 8 à 48 pouces destinés au transport du gaz naturel et produits pétroliers des installations des gisements de HassiR'mell (HR) et Hassi Messaoud (HM) au sud de l'Algérie vers les ports pétroliers et zones industrielles d'Arzew (AR) et Skikda (SK) au nord (annexe 2). Plus de 95% des aciers utilisés pour les gazoducs sont des aciers micro alliés à haute résistance. Ils sont obtenus par des schémas métallurgiques en augmentant la vitesse de refroidissement après laminage contrôlé. Les gazoducs sont soumis à des contraintes importants et un environnement corrosif. Pour cela le développement de nouveaux aciers HSLA pour gazoduc a été orienté vers une modification des propriétés mécaniques et d'éviter une augmentation trop importante de l'épaisseur des tubes. On est arrivé à obtenir un compromis entre une haute limite d'élasticité pour supporter des grandes pressions et une bonne ténacité afin de résister à la propagation de fissures grâce au développement des tôles TMCP obtenues par laminage à température contrôlée suivi d'un refroidissement accéléré. Les aciers sont passés du grade X52 au grade X70 employés de nos jours avec des microstructures ferrito-perlitique. Le passage à des grades supérieurs X80, XI00 passe par le développement d'aciers de structures ferrito-bainitiques.

Nous présenterons dans ce chapitre une description des aciers de gazoduc selon la norme API 5L des aciers des pipelines, leurs principales compositions, l'amélioration de leur limite élastique, le comportement dans différents milieux naturels en particulier le sol, et une présentation de la ligne **GZ1** l'objet de notre projet a la station de traitement des tubes (STT), SONATRACH, Bethioua. Au cours de leur exploitation, les pipelines sont confrontés à divers endommagements. Ces endommagements peuvent apparaître sous forme de fissures de fatigue, de délaminages, de formation de corrosion,... Pour prolonger la durée de vie de ces structures, nous représentons les méthodes des réparations (collage par patch, clock spring et demi-coquille) qui utilisé à la station de traitement des tubes (STT).



## II.1 Description de la STT

La station traitement tubes a été créée le 18 juillet 1999 en vue de prendre en charge la récupération des tubes entreposés sur les propriétés terriennes, l'inspection et le traitement complet des tubes récupérés en vue de les réutiliser sur les ouvrages à réhabiliter (annexe 4) et pour les interventions. Cette station est localisée au lieu-dit "sept marabouts" commune el Hassiane W. Mostaganem, elle s'étend sur une superficie de 10 hectares répartis, 07 ha pour le stockage et traitement des tubes, et 03 ha pour la base de vie. La capacité de stockage 100 000 ml de tubes à stocker.

### II.1.1 Réalisations de la STT

- Récupération de 120000 ml de tubes en acier carbone
- Inspection de 91250 ml de tubes en acier carbone
- Déclassés et/ou rebutés 28250 ml
- Caractérisation 76000 ml de tubes en acier carbone (soit un taux de récupération de 83%)
- Réutilisation de 71000 ml de tubes en acier carbone (une étude comparative : cout ml réhabilité  $\approx$  33% du cout ml neuf).

### II.1.2 Activités de la STT

- Réception des tubes provenant des zones réhabilitées,
- Décapage et pré sablage,
- Inspection des tubes et caractérisations,
- Traitement et revêtement de tubes,
- Contrôle de qualité.



**Figure II.1** : lieu de stockage des tubes (STT)

## II.2 les pipelines

### II.2.1 Définition

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des biens, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol. Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés, en zone de risque sismique ou politiquement instable. Au contraire de leur investissement initial ; leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances. [16]



Figure II.2 : pipeline [16]

### II.2.2 Défauts rencontrés dans les canalisations

Bien que le transport de produits dangereux par pipeline soit considéré comme un moyen de transport sûr et malgré la gestion rigoureuse du réseau de pipelines, des défaillances sont identifiées principalement dans la surveillance des travaux effectués dans ce couloir. La sécurité du réseau de transport et la disponibilité, exempte de perturbations de l'agent énergétique gaz naturel sont incontournables si l'on veut garantir la prospérité économique. La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à la corrosion, ainsi que leur incidence sur l'économie mondiale et leur impact sur l'environnement rendent le transport des hydrocarbures de plus en plus préoccupant.

Les cas les plus fréquents sont relatifs à des incidents amorcés à partir de défauts issus soit de l'élaboration du matériau, soit de la fabrication, de l'assemblage, de la réparation ou des conditions d'exploitations des tubes et qui ont conduit à la naissance et à la propagation des fissures superficielles où traverses suivies de fuites. On trouve six catégories principales de causes des accidents (annexe 7) :

- Agression externe ou activité tierce (les plus répandus) ;
- Corrosion interne ou externe ;
- Défaut de construction ou défaillance de matériels ou défaut mécanique ;
- Mouvement de terrain ou risques naturels en général ;
- Erreurs opérationnelles;
- Autres et causes inconnues.

La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à la corrosion, ainsi que leur incidence sur l'économie mondiale et leur impact sur l'environnement rendent le transport des hydrocarbures de plus en plus préoccupant. [16]



**Figure II.3** : Eclatements avec rupture franche de la canalisation [20]

### II.3 Evolution des gazoducs

Les sites de production de gaz naturel (Mer du Nord, Russie, Algérie) sont souvent très éloignés des lieux d'utilisation. Le gaz est alors acheminé à l'aide de tubes (pipelines ou gazoducs) sur des distances de plusieurs milliers de Kilomètres. Pour augmenter la rentabilité d'un gazoduc ; il est intéressant d'utiliser des structures de diamètre plus grand et de transporter le fluide sous une pression plus élevée. La figure II.4, présente l'évolution constatée dans ce domaine au cours des trois dernières décennies. Nous voyons que, de 1958 à 1992, le diamètre des plus gros pipelines utilisés a doublé, passant de 700 à 1400 mm. Pendant ce temps l'épaisseur était multiplié environ par quatre et la pression de transport par trois.[21]

Ces variations ne sont pas sans conséquences sur les caractéristiques mécaniques des aciers utilisées pour la fabrication des tubes. En effet, sous une pression  $P$ , la contrainte circonférentielle  $\sigma_c$ , dans un gazoduc de rayon  $R$  et d'épaisseur  $e$  vaut :

$$\sigma_c = P R / e \quad (\text{II.1})$$

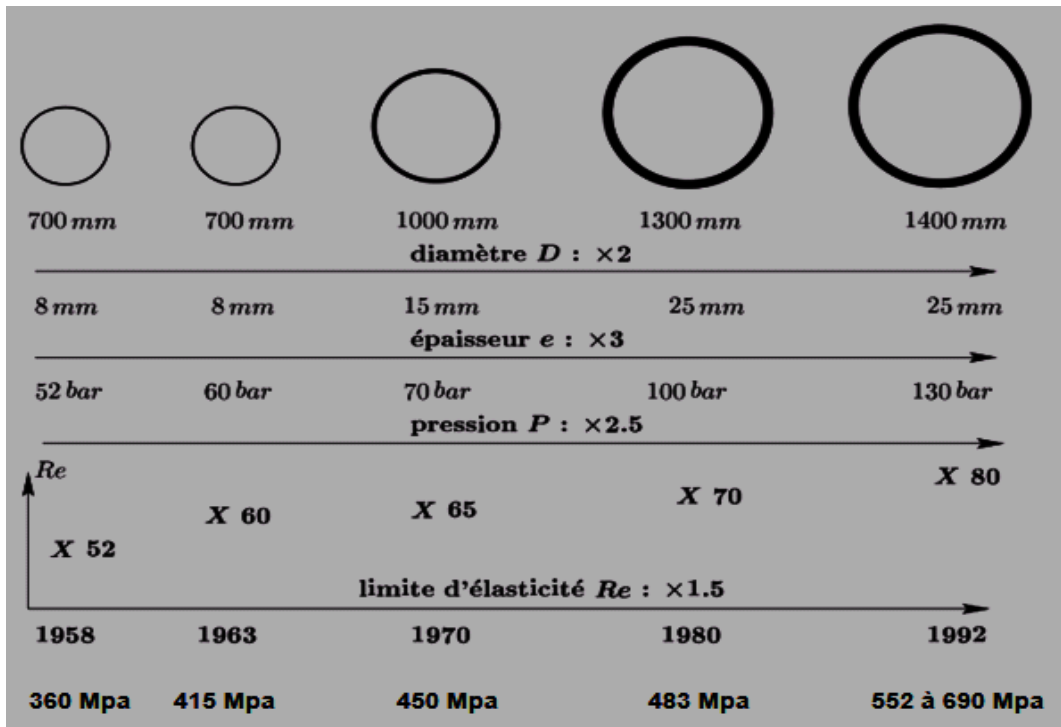


Figure II.4 : évolution des gazoducs depuis 40 ans [21]

## II.4 Acier de gazoducs

Les aciers pour gazoducs dits aciers HSLA (High Steellowallows) sont caractérisés par des propriétés mécaniques de résistance afin de supporter des débits de gaz aussi élevés que possible. La limite d'élasticité est passée de 360 à 560 Mpa en 40 ans, pendant le même temps, la soudabilité du matériau et sa résistance à la rupture ont également été améliorée. Deux types de microstructure ont été retenues, la microstructure du matériau peut être ferrito-perlitique et ferito-bainitique et 95% des aciers utilisés par les gazoducs sont des aciers micro allié à haute résistance (HSLA). [22]

$$R_p = \sigma_0 + \sigma_s + \sigma_p + \sigma_d + \sigma_t + (ky / \sqrt{d}) \tag{II.2}$$

Avec :

$R_p$ : la limite d'élasticité de l'acier

$\sigma_0$ : Friction du réseau=70 MPa

$\sigma_s$ : Durcissement par solution solide

$\sigma_p$ : Structure de la dislocation

$\sigma_d$ : Structure de dislocation

$\sigma_t$ : Texture.

Le terme  $k_y/\sqrt{d}$  traduit le durcissement de l'acier dû à un affinement du grain ferritique en effet les joints du grain sont des obstacles au mouvement de la dislocation dans un poly cristal, ce terme est dite loi de Hall – Petch. [23]

d :taille de grain ferritique

$K_y$  : constante

Ce mécanisme joue un rôle tout particulier, car il est le seul qui permet d'améliorer la ténacité des aciers. Le procédé est basé sur le laminage contrôlé suivi d'un refroidissement accéléré. La température de fin de laminage est prise juste supérieure à  $A_{r3}$  pour éviter le laminage inter critique. Une nouvelle microstructure peut être alors

obtenue en jouant sur la vitesse de refroidissement  $V_r$ , lorsque ce paramètre augmente, la ferrite produite n'est plus polygonale mais aciculaire. La microstructure des aciers ainsi obtenus est un agrégat complexe de phases variées, que l'on peut distinguer de la manière présentée dans la figure II.5.

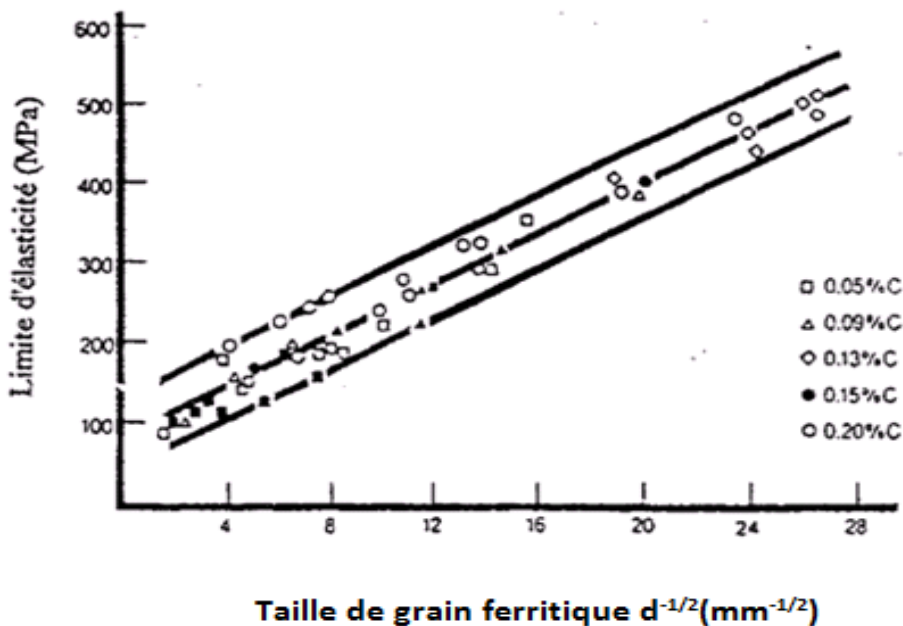


Figure II.5: effet de la taille du grain ferritique sur la limite d'élasticité [24]

Une ferrite polygonale ; classique (fp) est similaire à celle sur les aciers ferrito-perlitique. Une ferrite-aciculaire ; (fa) appelée aussi bainite bas carbone, qui est en fait une ferrite dans les grains est de forme très irrégulière et avec fort densité de dislocation ( $10^{10} / \text{cm}^2$ ) environ. Elle diffère de la bainite par l'absence de cémentite, cette ferrite est fortement écrouée, ce qui augmente le terme  $\sigma_d$ .

II.4.1 Affinements de grain ferritique

II.4.1.1 Effet de la taille du grain

Tout procédé métallurgique permettant de déterminer la taille du grain ferritique présente donc un grand intérêt sur la structure, [25]. Ce à l'origine du développement du laminage contrôlé. En imaginant un mécanisme de naissance du clivage sur un plan {100} par auto blocage de deux glissements sur des plans {110}.

Cottrell à montrer que la contrainte de clivage d'un acier ferritique est  $\sigma_c$  proportionnelle à  $d^{-1/2}$ . En effet  $\sigma_c$  augmente plus rapidement que la limite d'élasticité lorsque la taille du grain diminue. Ce si favorise la rupture avec grande déformation plastique et diminue à température de transition (figure II.6).

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \tag{II.3}$$

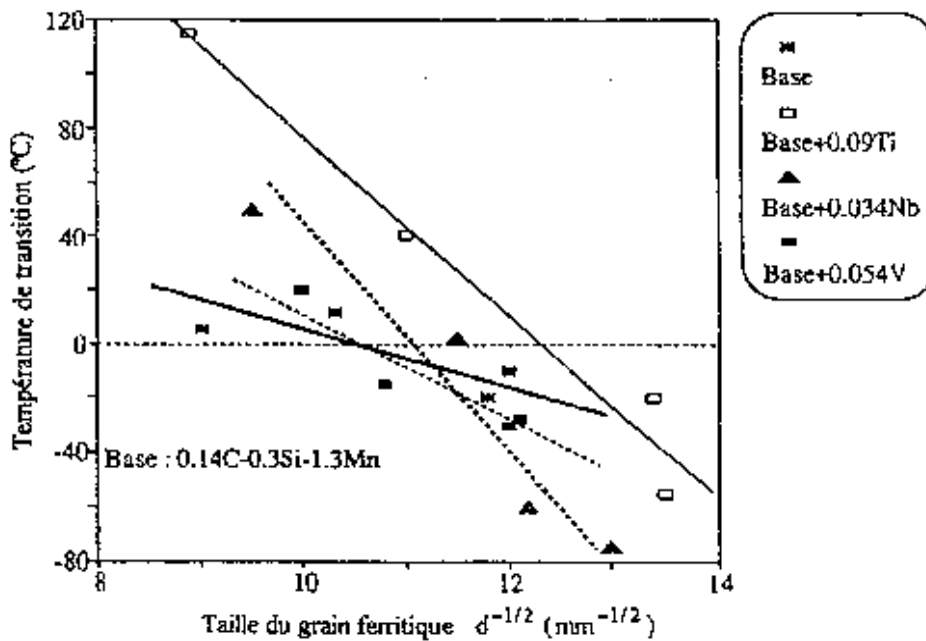


Figure II.6 : effets de la taille du grain ferritique sur la température de transition [24]

Le but est d'abaisser la taille du grain ferritique par des conditions de déformation particulières dans l'austénite à chaud.

II.4.1.2 Effets de laminage

Au contraire on dira que dans le laminage il y a continuité dans la déformation de la pièce car le renouvellement de la matière est constamment assuré par la rotation des cylindres. Dans le laminage, la déformation du métal est effectuée entre deux cylindres tournant en sens inverse entre lesquels la barre est entraînée sous l'effet du frottement. Si  $f$  est le coefficient des frottements compris entre 0,1 et 0,6 et si  $F$  est la force

exercée par les cylindres perpendiculairement au déplacement du produit on a pour valeur de la force de frottement

$$\mathbf{T} = \mathbf{F.f} \quad (\text{II.4})$$

En réalité, la force de frottement  $T$  résulte de la résistance du métal à la déformation qui engendre sur les cylindres une force  $F$  appelée force de séparation. Par suite de la réduction de section, la vitesse de la barre varie entre l'entrée et la sortie, le rapport de ces vitesses est égal à l'inverse du rapport correspondant des sections puisque le volume de métal déformé reste constant. Le laminage des produits pour tubes (tôles ou bobines) sera traité dans ce cours.

Sur le plan métallurgique, les caractéristiques mécaniques des tôles obtenues dépendent des schémas de laminage adoptés, et l'on peut distinguer deux types de laminage :

- le laminage normal
- le laminage contrôlé

#### a) laminage normal

Le laminage normal est une simple opération de mise en forme : Effectuée à température élevée pour profiter au maximum de la malléabilité du métal et alléger ainsi la charge de l'outil.

Conduite rapidement afin d'obtenir un bon taux de productivité. La température de fin de laminage ne dépend, toutes choses égales par ailleurs, que de l'épaisseur de la tôle et est en général assez élevée

(> 900/1000 °C) ce qui conduit à une structure grossière à des caractéristiques mécaniques médiocres à l'état brut de laminage. Le laminage normal est dans bien des cas suivi d'un traitement de normalisation qui efface en partie la structure obtenue, affine le grain et améliore les caractéristiques mécaniques des tôles. [26]

#### b) laminage contrôlé

Le laminage contrôlé n'est pas une simple opération de mise en forme car il est conduit de façon à obtenir en outre les caractéristiques mécaniques finales du produit directement à la sortie du laminoir. C'est un traitement thermomécanique à haute température dont l'objectif est l'obtention d'une structure ferito-perlitique ou ferrito-bainito-perlitique à grains fins.

Le principe de base du laminage contrôlé consiste à imposer les températures auxquelles sont effectuées les différentes passes de laminage, de façon à contrôler les phénomènes d'écroutissage et de recristallisation. Les principaux phénomènes mis en jeu à ce niveau sont schématisés sur la figure II.7.



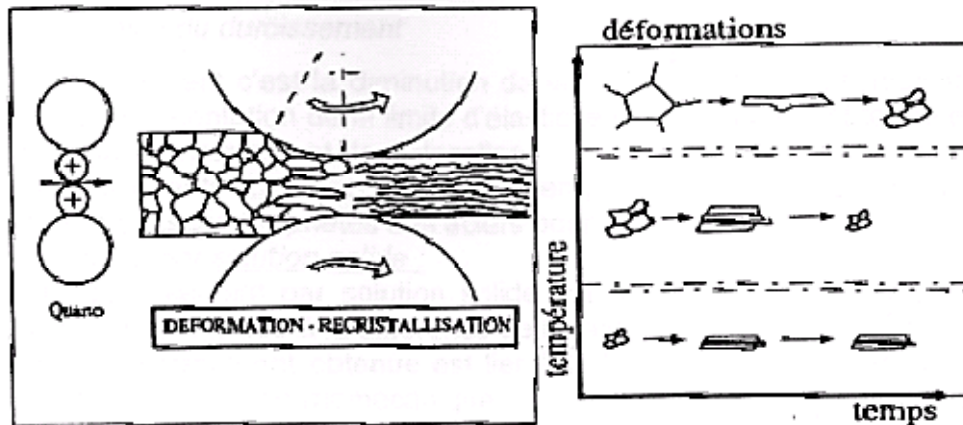


Figure II.7 : laminage contrôlé[26]

- A haute température, la recrystallisation et la croissance du grain sont rapides. De ce fait, les réductions effectuées dans ces conditions ne sont pas efficaces métallurgiquement, mais servent uniquement à rapprocher la géométrie de l'ébauche de celle du produit final.

- Le laminage effectué aux températures intermédiaires conduit, s'il est bien mené, à une structure constituée de grains fins et recrystallisés.

- En dessous d'une certaine température, dite de non recrystallisation, les passes sont additives et conduisent à une structure de grains fins et non recrystallisés. Dans ces conditions l'énergie de déformation développée dans le domaine est pleinement utilisée pour une germination intense de la ferrite, et ce d'autant plus que le laminage est terminé à une température plus proche de celle du point de transformation.

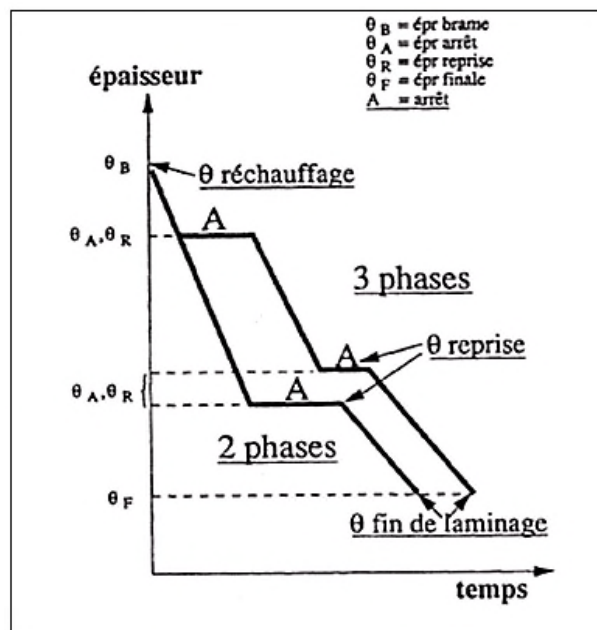


Figure II.8 : principe de laminage contrôlé [26]



### II.4.1.3 Effets du durcissement

Le durcissement c'est la diminution de la taille du grain et l'écroutissage de la ferrite, donc l'augmentation de la limite d'élasticité de la ferrite est obtenue en limitant ou en bloquant le mouvement de dislocation. On trouve différents types de durcissement et on va présenter le rôle du durcissement dans les propriétés des aciers pour gazoducs.

#### a- durcissement par solution solide

L'effet du durcissement par solution solide est principalement dû à la distorsion du réseau cristallin du fer due à la différence de la taille entre l'atome de fer et un atome de soluté, le durcissement obtenu est lié à la teneur en élément d'alliage et très peu au traitement thermomécanique (figure II.9). (Laminage contrôlé, refroidissement accéléré). Les éléments apportant le plus de durcissement sont le silicium, le cuivre et le manganèse, le phosphore est pour sa part comme une impureté.

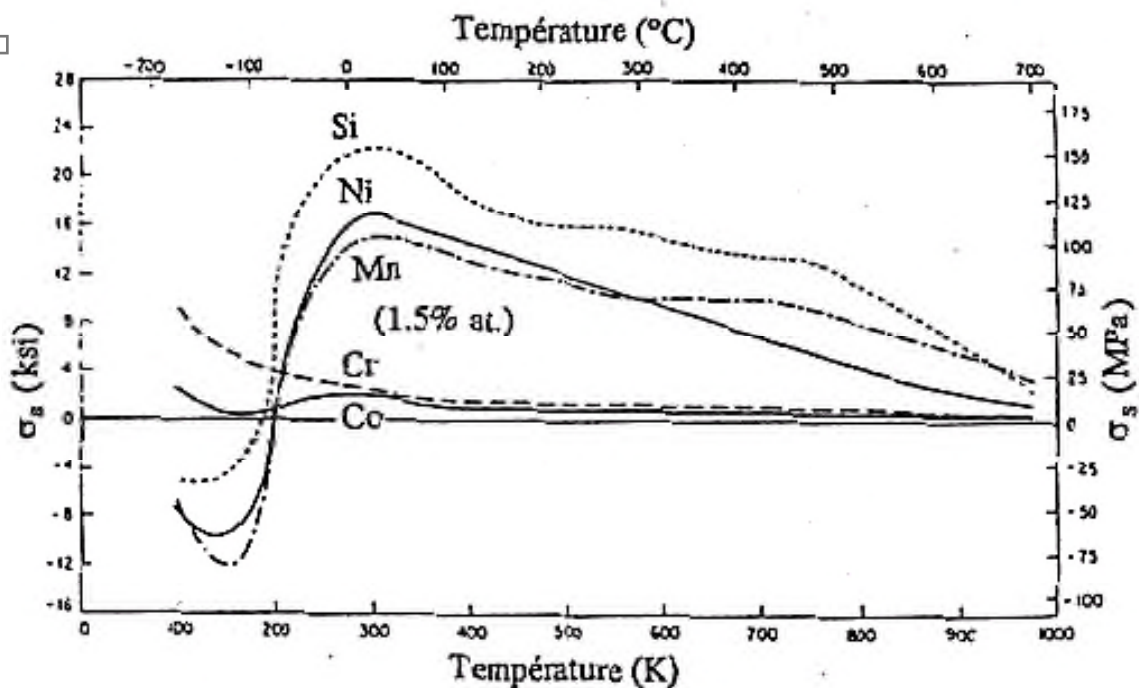


Figure II.9: durcissement par solution solide[27]

#### b- durcissement par précipitation

Le rôle des précipités de carbonitrides de niobium, de vanadium ou de titane est double, ils agissent comme obstacles au mouvement des dislocations donc augmentent la résistance de l'acier par l'intermédiaire du terme  $\sigma_p$  de l'équation (II.2). Le durcissement est d'autant plus important que la taille des précipités est petite et ceux-ci sont nombreux.

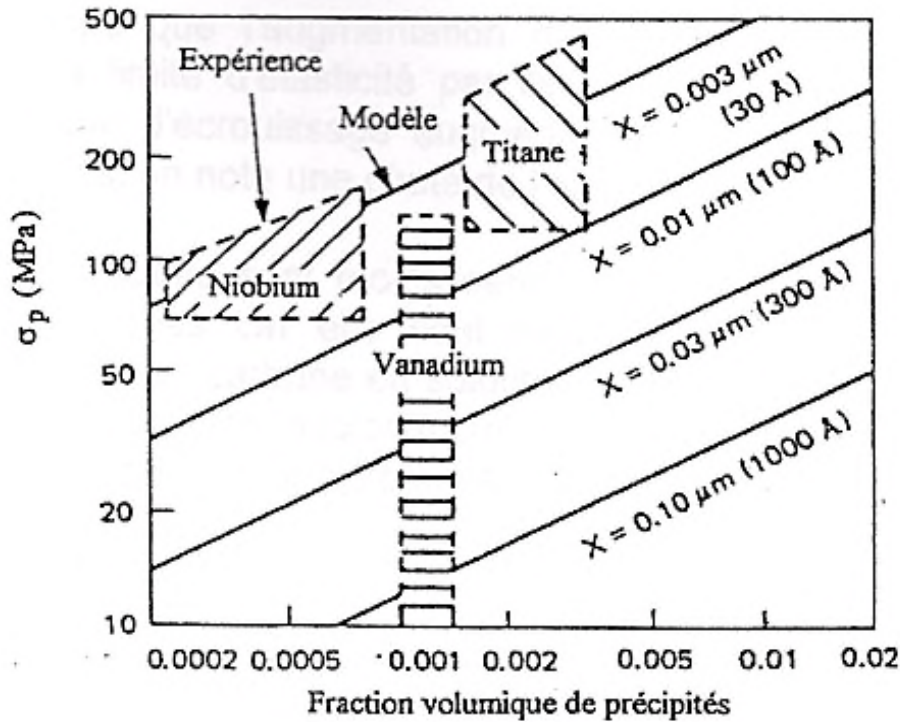


Figure II.10: durcissement par précipitation [27]

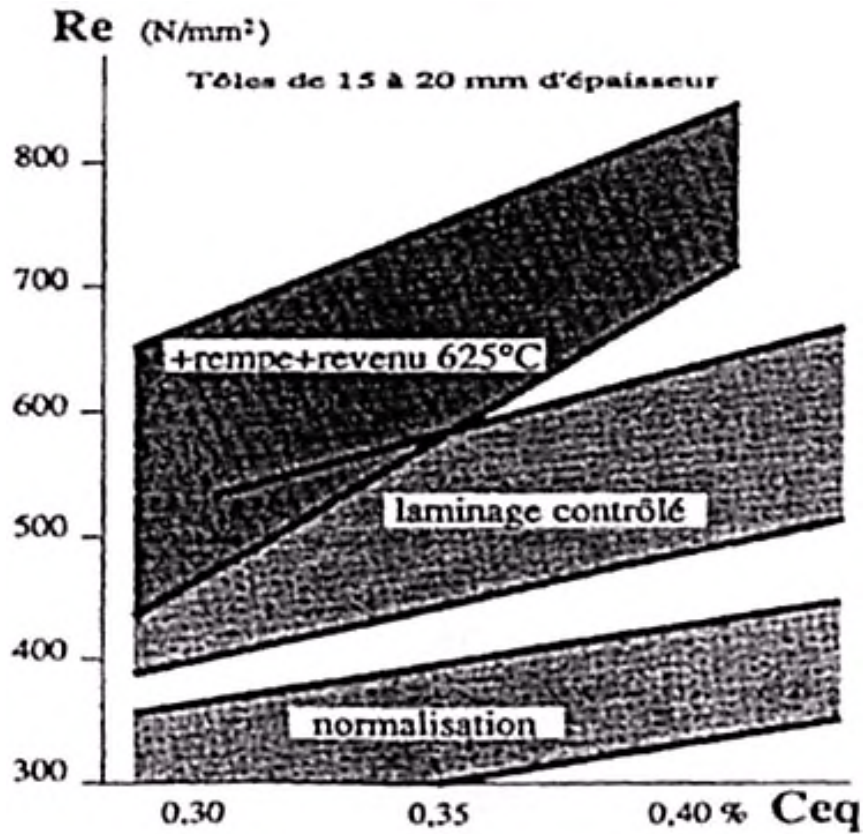
La figure (II.10) résume l'intérêt de parvenir à une microstructure très fine pour augmenter la limite d'élasticité et diminuer la température de transition.

### c- durcissement par diminution de la taille du grain ferritique

La diminution de la taille du grain ferritique se fait en baissant la température de transformation austénite ferrite, et les manganèses et le nickel sont utilisés également pour cette raison dans les aciers pour tubes.

#### II.4.1.4 Effets du taux de carbone

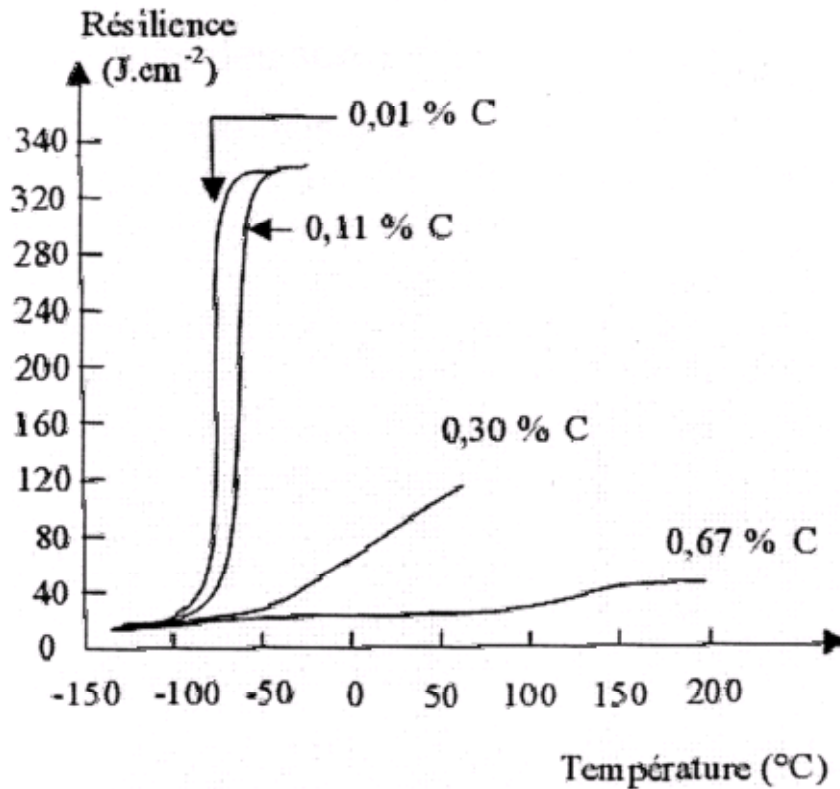
Bien que la teneur en carbone soit maintenue à un niveau très bas dans les aciers pour pipe, généralement inférieur à 0.012%. Cet élément est très soluble dans la matrice ferritique. Il se trouve principalement sous forme de perlite dans la matrice ferritique, l'impact de la présence de cette phase sur les propriétés mécaniques peut être schématisé de la manière suivante :



**Figure II.11:** la variation de la résistance par rapport au taux de carbone [25]

Cette figure indique que l'augmentation du taux de perlite se traduit par une amélioration de la limite d'élasticité par l'introduction d'une phase dure dans la matrice. La capacité d'écrouissage augmente également par un effet dual phase dans le même temps, on note une chute de l'allongement à la rupture.

Les structures bainitiques sont moins sensibles au traitement de revenu que les structures martensitiques car elles sont moins hors équilibre, et la densité de dislocations et le taux de carbone en solution sont plus faible que pour les structure martensitique. Les évolutions microstructurales au cours du revenu sont donc en général moins importantes pour les bainites que pour les martensites.



**Figure II.12:** effet du taux de carbone sur la courbe de transition CHARPY (constant et al, 1992)

La teneur en carbone des aciers pour tubes revêt est importante, particulièrement pour le contrôle des propriétés mécanique final de l'acier. [25]

## II.5 Caractéristiques des aciers (norme API 5L)

### II.5.1 Caractéristique mécanique

Les qualités d'acier couramment utilisés dans la construction des pipelines sont définies dans deux spécifications **API** qui sont adoptées depuis 1992 par l'industrie pétrolière américaine dénommée :

- 5L pour les qualités normales
- 5LX pour les qualités a haute résistance

Les qualités d'acier les plus employées ont les propriétés mécaniques présentes dans le tableau II.1

**Tableau II.1** : Propriétés mécanique des aciers pour tubes selon la norme API [28]

Spécification API	grade	Limite d'élasticité (kg/mm <sup>2</sup> )	Résistance à la rupture (kg/mm <sup>2</sup> )
5L	A	21	34
5L	B	25	42
5LX	X42	29	42
5LX	X46	32	45
5LX	X52	37	47
5LX	X56	39	52
5LX	X60	41	55
5LX	X65	46	56
5LX	X70	48	56

### II.5.2 Composition chimique

La composition chimique des aciers de l'API se présente dans le tableau suivant :

**Tableau II.2:** composition chimiques en % de l'acier X60 et X100 [22]

grade	C	Mn	Si	P	S	AL	Cr	Mo	Ti	V
X60	0.19	1.15	0.20	≤	≤	0.02	≤	≤	0.03	0.11
	à 0.24	à 1.35	à 0.40	0.025	0.025	à 0.04	0.02	0.05	à 0.04	à 0.15
X100	0.29	0.15	0.15	≤	≤	≤	0.5	≤	≤	0.03
	à 0.34	à 0.34	à 0.30	0.025	0.025	0.04	à 0.65	0.05	0.04	à 0.070

### II.6 Ténacité de l'acier

La première caractéristique de la ténacité d'un acier est la température de transition, ductile-fragile, ou l'on cherche à diminuer celle-ci pour privilégier le domaine ductile ou la ténacité est bien meilleure. Une microstructure fine permet de diminuer la température de transition, loi de Hall et Petch, permet de relier la contrainte clivage à la taille de grain qui conduit à une diminution de la température de transition par du grain ferritique. Tous les autres procédés de durcissement, précipitation et solution solide, ont pour effet d'augmenter la température de transition; seuls le manganèse, le nickel et l'aluminium peuvent dans une certaine mesure diminuer la température de transition par des effets secondaires.

L'influence de la propreté inclusionnaire sur les propriétés de rupture ductile n'est plus à démontrer parce qu'elle constitue des sites privilégiés d'endommagement par germination de micro-cavités qui ont un rôle néfaste sur la tenue à la rupture ductile. Les deux manifestations les plus évidentes de ce rôle sont une chute de la résilience et de la ductilité en traction. La résilience dans la direction travers de la tôle est généralement plus faible que dans la direction de laminage.[29]

## II.7 Description de la ligne GZ1 40''

### II.7.1 présentation de la ligne

Les terminaux sud sont tous les points du réseau qui se trouvent à la racine de chaque canalisation sud. Leur nombre a augmenté au fur et à mesure que les gisements ont été découverts. Actuellement, ils sont au nombre de neuf, répartis entre terminaux de champs de pétrole et terminaux de champs de gaz naturel, et ce nombre est appelé à augmenter dans les années avenir. La situation géographique des gisements amène à investir dans la construction de ce réseau de canalisation. Elle entraîne aussi la mise en œuvre d'un arsenal d'installation, de matériels et la mobilisation de plus de 10000 employés pour maintenir une production permanente en assurant le bon fonctionnement de ces régions devenues ainsi des terminaux. La structure d'exploitation de TRC (Région Transport par Canalisation) gère un réseau qui totalise 11 gazoducs et 15 oléoducs (Tableau II.3), (annexe 1).

**Tableau II.3:** caractéristiques des canalisations du sud algérien (TRC-DRC. Sonatrach)

nature	ouvrages	Symbole	Diamètre en pouce	Longueur en Km	Nombre de Station	Puissance installée en CV	Année de mise en service	Produit
Existants	HR-AR	GZ0	24''/20''	509	4	50372	1961	GAZ
	HR-AR	GZ1	40''	507	5	304000	76/79	
	HR-AR	GZ2	40''	507	5	225000	1982	
	HR-AR	GZ3	42''	507	5	304000	1989	
	HR-Skikda	GK1	40''	573	5	318250	71/78	
	HR-O. Safsaf (Tunisie-Italie)	GO1	48''	549	01	138980	1982	
	HR-O. Safsaf (Tunisie-Italie)	GO2	48''	549			1986	
	HR-Laricha (Maroc-Espagne)	GME	48''	521	-	-	1996	
	HR-Isser	GG1	42''	436	-	-	1981	
	Alrar-HR	GR1	42''/48''	965	1	20100	1987	
	Gassi.Touil-HMD	GM1	40''	150	-	-	1976	
En Construction	HR-Skikda	GK2	42''	573	-	-	-	
	Alrar-HR	GR2	42''/48''	962	4	338776	-	
En projet	Après extension G01/G02	-	-	-	+02 (3)	+277960	-	
	Extension GME	GME	-	-	01	75780	Fin 2002	
	Tiguentour-HR	GIS	42''ou 48''	526	En cours	En cours	-	
	Interconnexion gazoducs de l'est à l'ouest	-	40''	1000	-	-	-	



<b>Existant</b>	HEH-AR	OZ1	28''	801	6	134500	1965	<b>Pétrole Brut</b>
	HEH-Skikda	OK1	34''	637	4	124680	1972	
	HEH-Bejaia	OB1	24''/22'	660	7	73420	1959	
	b.Manssour-Alger	OG1	16''	131	1	900	1971	
	In Aménas-Tunisie	OT1	24''	265	2	15608	1960	
	El Borma-Mesdar	OD1	20''	272	1	2160	1977	
	Ohanet-HEH	OH1	30''	630	3	45589	1983	
	Mesdar-HEH	OH2	26''	108	1	4500	1972	
	H.Berkine-HEH	OH3	30''	292	-	-	Juil 1999	
	<b>En projet</b>	HEH-AR	OZ2	34''	821	6	115600	
Extension station Mesder		OH2	-	-	1	10869	2002	
Extension station HEH-Skikda		OK1	-	-	1unité SP1 2unit SP3	50000	2002	
<b>Existants</b>	HR-AR	NZ1	28''	506	3	63760	1978	<b>Condensat</b>
	Ohanel-HEH	NH2	30''	518	-	-	1961	
	HR-HEH	NH1	8''	306	-	-	1960	
<b>Existants</b>	HEH-AR	LNZ1	12''/16'	801	5	16493	1973	<b>GPL</b>
	HR-AR	LZ1	24''	504	1	10500	1983	
	Alrar-HR	LR1	10''-24''	988	4	28900	1997	
<b>Enprojet</b>	Looping[R] Ohanel-G.touil	LR1	16''	404	-	-	2001	
	HR-AR	LZ1	-	-	1	10500	2001	

La ligne de transport du gaz naturel GZ1 est constituée de tubes en aciers (type roulés soudés), sur une distance de **507** Km pour relier le gisement de gaz naturel de HassiR'mel (HR) et le terminal de raffinerie a Arzew (AR).La ligne dispose cinq stations de compression (SC), réparties sur la ligne assurent la mise sous pression du fluide gazeux nécessaire à son écoulement(Figure II.13), l'implantation des stations de compressions de la ligne**GZ1** (tableau II.5).



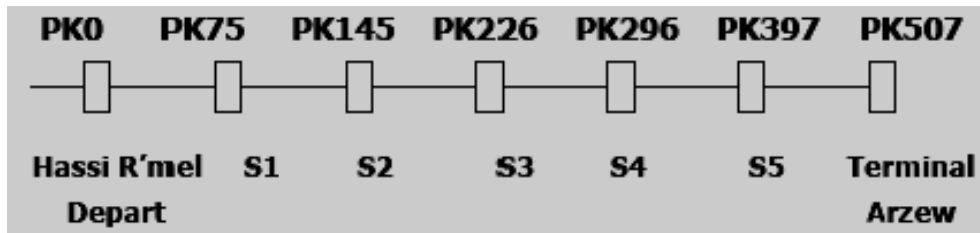


Figure II.13: Station de compression de la ligne GZ1

Tableau II.4: Implantation stations de compressions GZ1

Désignation	PK (Km)	Altitude (m)	T(c°) ambiante	Lieu
HR	0	747	40	HassiR'mel
SC <sub>1</sub>	75	840	40	Timzet
SC <sub>2</sub>	146	4025	40	M'seka
SC <sub>3</sub>	226	970	40	Medareg
SC <sub>4</sub>	295	1255	35	Nador
SC <sub>5</sub>	397	525	35	Kenenda
AR	507	20	35	Arzew

La spécification technique de la ligne du gaz GZ1, qui relie HassiR'mel à Arzew, est donnée dans le tableau suivant :

Tableau II.5 : spécification technique de la ligne GZ1 40'' (DRC)

Ligne	Longueur (Km)	Diamètre (pousse)	Catégorie	Nuance	Epaisseur (mm)	Masse nominale (kg/m)	PK
GZ1	507	40''	III	X60	12.7	275.65	0-288
		40''	II	X52A	12.7	314.18	288-507
		40''	I	X52a	19.05	465.2	Entrée et sortie

Tableau II.6: paramètre énergétiques maximums d'écoulement du gaz a la sortie des stations de compression SC de GZ1

	Température max	Température min	Pression max	Pression min	débit
GZ1	81 c°	40 c°	69.8 bars	42 bars	15.33 m <sup>3</sup> /an

Une inspection a été faite par une entreprise Américain de détection des défauts dans les pipelines dans le tronçon qui relie le SC1 et SC2 (Timzet et M'seka) et qui nous a donnée des résultats des différents pics de corrosion présenter dans le tableau (II.9).[12]

### II.7.2 Caractéristiques du matériau de l'étude X60

#### II.7.2.1 Composition chimique du matériau

La composition chimique du matériau a été faite par analyse spectrophométrie sur machine type "SPECTRORp 212" disponible au niveau de l'usine ALPHAPIPE à Annaba de production des tubes en spirale.[30]

Tableau II.7 : Composition chimique (en %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.213	0.380	1.35	0.015	0.016	0.025	0.024	0.013
Al	Co	Cu	Nb	Ti	(S+P)	Ceq	Fe
0.067	0.007	0.029	0.078	0.003	0.031	0.45	97.8

On notera que la teneur en soufre est très basse par rapport aux teneurs rencontrées dans les nuances des tubes de transport actuels. Il en résulte une basse teneur inclusionnaire et donc une bonne ductilité. Par ailleurs on révèle la présence de très petite quantité d'aluminium (pour la désoxydation).

#### II.7.2.2 Essai de traction (caractéristique mécanique)

L'essai de traction consiste à exercer sur un barreau prismatique ou cylindrique, des efforts croissants qui vont la déformation puis le rompre. L'essai se fait sur une machine universelle type Machine "Spécial métal SP" avec entraînement hydraulique centrale, capacité entre 400 et 2000 Kn.

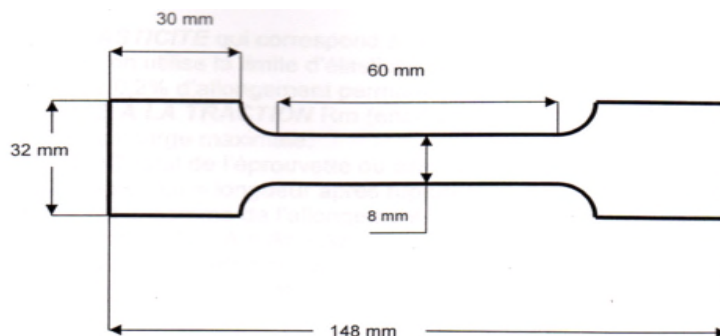


Figure II.14 : éprouvette de l'essai

Les figures suivantes montrent l'éprouvette avant et après essai.

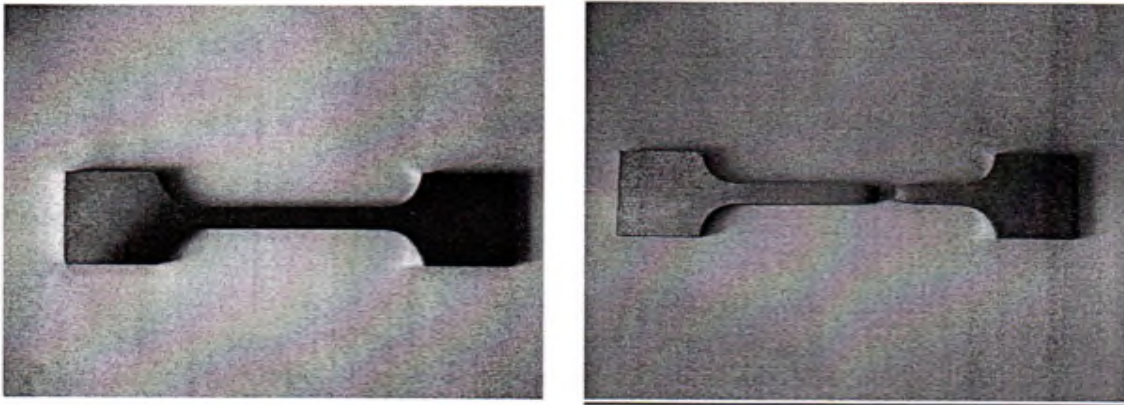


Figure II.15 : éprouvette de traction avant et après essai[30]

L'examen du diagramme effort-allongement figure (II.16) fait apparaître plusieurs domaines :

- Un domaine élastique OA dans lequel les déformations sont réversibles.
- Un domaine plastique AC dans lequel les déformations sont permanentes de A à B

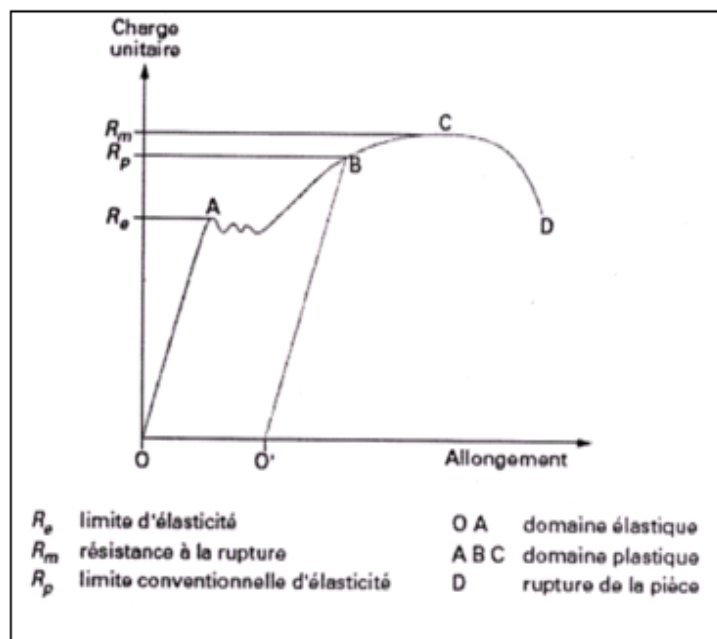


Figure II.16: Courbe effort allongement[30]

On définit :

**La limite d'élasticité ( $R_e$ )** qui correspond à la fin du domaine élastique.

**La résistance à la traction  $R_m$**  (charge de rupture) qui correspond à la charge maximale.

**L'allongement total(A)** de l'éprouvette ou allongement de rupture ( $L_0$  : longueur initiale,  $L_u$  : longueur après rupture).

**La striction(Z)** qui est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue ( $S_0$ : section initiale,  $S_u$  section minimale après rupture).

Les résultats de l'essai de traction pour l'acier X60 et donnée sur le tableau suivant :

**Tableau II.8** :résultat d'essai de traction[30]

Essais	Re (MPa)	Rm (MPa)	A %	Z %
1	410	557	32	49
2	413	569	30	53
3	417	578	33.3	55
Moyen	413.33	568	31.76	52.33

Ces résultats montrent que les valeurs sont proches de l'acier API 5L X60.

## II.8 Inspection en ligne et diagnostic

L'inspection en ligne par outil intelligent peut fournir presque toutes les informations requises pour l'évaluation de l'état technique d'un pipeline. Cependant, le soin est laissé à l'opérateur de décider des choix à faire pour réhabiliter l'ouvrage et les moyens à mettre en œuvre pour le maintenir en bonne condition. Un grand nombre de pipelines à travers le monde ont dépassé la limite d'âge prévue de leur utilisation. Ils continuent pourtant à être parfaitement fonctionnels. Ceci moyennant un suivi régulier de leur état technique et une politique de maintenance appropriée. La question fondamentale qui se pose dans ces cas-là est la suivante : Réparation ou réhabilitation ? La première étape pour répondre à cette question est un programme détaillé d'inspection pour obtenir les données nécessaires à l'évaluation de l'état de la ligne.[31]

### II.8.1 Action de pré-inspection

Le but de ces travaux est la confirmation de l'accessibilité de la conduite à l'outil intelligent. La planification d'une inspection passe en général par trois étapes :

- Nettoyage de la conduite par outil conventionnel ;
- Envoi de l'outil géométrique en vue de détecter les risques de blocage ;
- Envoi de l'outil intelligent pour la localisation des pertes de métal et l'évaluation de leur importance.

Les opérations de pré-inspection peuvent ne pas être un préalable à l'envoi de l'outil intelligent dans le cas où :

- Le pipeline est nouveau et a subits tous les tests de calibrage et de nettoyage avant sa mise en service :
- La conduite est considérée comme propre en raison de l'envoi périodique d'outils conventionnels (un minimum de quatre envois par an).

Il est par contre nécessaire de recourir aux opérations de pré-inspection dans le cas ou :

- Le pipeline a plus de 10 ans d'âge est n'est pas nettoyé régulièrement ;
- Le pipeline est susceptible de former des hydrates, des dépôts de condensât, des accumulations d'eau, des dépôts de paraffine,...etc ;
- A plus de 60 Km de longueur.[31]

### II.8.2 Outils d'inspection en ligne

Le premier outil d'inspection en ligne a été mis à la disposition des opérations il y a une trentaine d'année. Depuis, ces techniques ont connues de nombreux progrès principalement concernant la précision de la détection et la fiabilité des instruments.

Les outils d'inspection modernes, équipés de capteurs, doivent pouvoir :

- Parcourir plusieurs centaines de kilomètres ;
- Détecter les anomalies présentées sur la conduite ;
- Traverser les coudes à faible rayon de courbure ;
- Surmonter les conduites verticales ;
- Dépasser les vannes incomplètement ouvertes....etc.

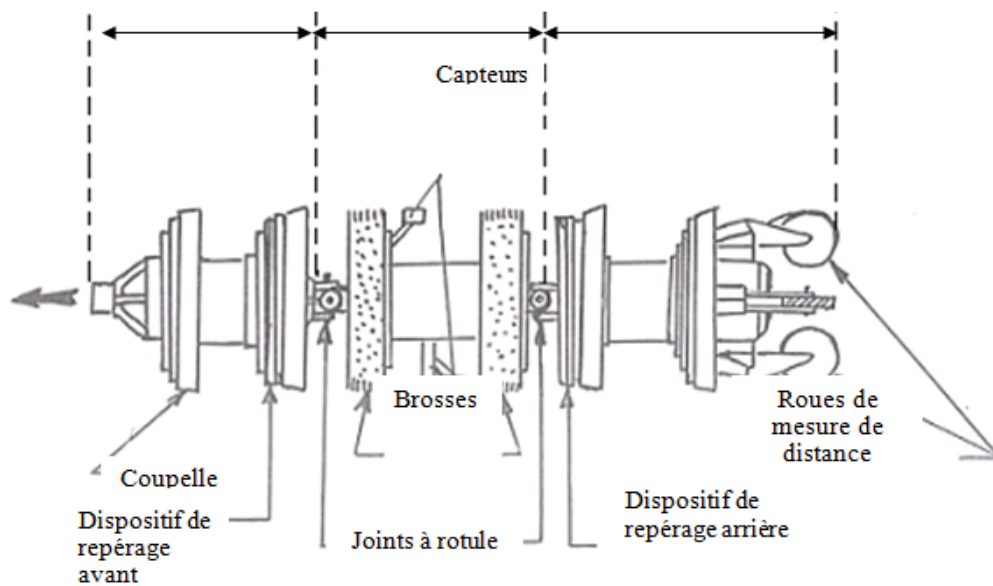
La détection de pertes de métal et de fissurations est le domaine ou l'utilisation d'outils intelligents a connu le plus d'intérêt. Deux techniques sont émergées concernant la détection des pertes de métal :

- Détection par flux magnétique MFL (magnétique flux leakage) ;
- Détection par ultrasons U/T (ultrasonique technique).

#### II.8.2.1 Les techniques MFL

Cette technique utilise de puissants aimants induisant un flux magnétique dans la paroi de la conduite. Des capteurs placés entre les pôles détectent tout changement d'intensité résultant d'une perte de métal ou d'un changement d'épaisseur. La puissance du flux magnétique requise est relativement élevée. Les premiers outils MFL ont particulièrement souffert de cet inconvénient surtout pour les grands diamètres. La firme TUBOSCOPE, qui commercialisé le premier outil intelligent, a choisi d'utiliser des électroaimants permanents. BRITISH GAZ a ainsi réussi à multiplier par dix la puissance des aimants permanents en développant de nouveaux matériaux magnétiques tels que le N.I.B (Neodinium-Iron-Bore). Un autre axe ayant favorisé le développement des technologies MFL concerne les progrès réalisés dans la

technologie des capteurs. Les premiers capteurs étaient très larges et donnaient lieu à des pertes de contact avec la paroi à chaque changement de direction de la conduite (au niveau des zones de courbure particulièrement). Les capteurs actuels se sont considérablement améliorés au point où la détection des pertes de métal et même possible au niveau des cordons de soudure et sur la face interne et externe de la paroi. Ils peuvent même être adaptés pour mesurer l'épaisseur absolue de la conduite. La quantité de données enregistrées s'est considérablement accrue à tel point que BRITISH GAS, dans un document publicitaire et pour donner un ordre de grandeur, affirme que l'équivalent de la bible était enregistré toute la six secondes.[31]

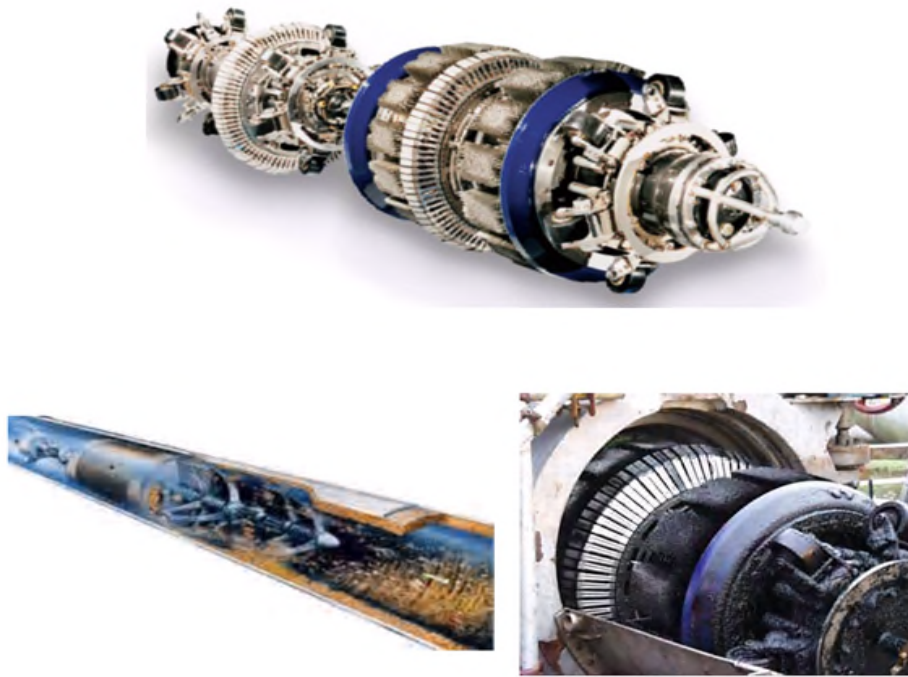


**Figure 2.17:** Piston Instrumenté Basé Sur Le Principe De Perte De Flux Magnétique[31]

### II.8.2.2 Les outils ultrasoniques

Leur principe de fonctionnement est assez simple. Un transducteur émet des pulsations ultrasoniques. En rencontrant la surface intérieure un premier écho se produit. Un deuxième écho se produit lorsque la pulsation atteint la face extérieure de la conduite. La vitesse de propagation de l'onde ultrasonique étant connue, le temps séparant la perception des deux échos donne l'épaisseur exacte de la conduite. Cependant cette technique ne peut être utilisée qu'en présence d'un couplant liquide. De plus, le transducteur (l'émetteur d'ultrasons) doit être placé à une distance constante de la paroi avec une inclinaison bien définie. Ce qui pose un problème au niveau des courbures de conduite. Le non-respect de ces exigences peut entraîner des erreurs de lecture et donc d'interprétation. La technique UT a été étendue à la détection des pertes de métal dans les gazoducs moyennant l'utilisation d'un couplant (un gel) compris entre deux outils conventionnels. La figure suivante représente l'outil intelligent.





**Figure II.18:** Outil intelligent Magne-Scan HR[32]

La technique ultrasonique représente les avantages suivants dans un environnement de pipeline :

- Mesures directes de l'épaisseur de la profondeur des anomalies ;
- Grande exactitude des mesures de l'épaisseur de la paroi et de la profondeur des anomalies (mesures quantitatives) ;
- Taux élevé de répétition des résultats sur des passages répétés ;
- Une anomalie dans la paroi peut être détectée à partir d'un diamètre de 10 mm, la profondeur exacte d'une anomalie peut être mesurée à partir de 20 mm ;
- Distinction précise entre les anomalies intérieures et les anomalies extérieures (à l'exception des défauts avoisinants des soudures) ;
- L'identité d'enfoncements, d'ondulations (fait pendant le cintrage du tuyau) et d'autres ondulations ainsi que des secteurs réparés peuvent être facilement établie ;
- L'équipement ultrasonique peut être ajusté en une fois, même si l'épaisseur de la paroi change ;
- L'interprétation des résultats est facilement compréhensible, les diagrammes colorés sont éloquentes ;
- Des excavations de contrôle pour déterminer le type d'anomalie ne sont pas requises.[31]

### Notation

- Les techniques MFL ne sont pas influencées par la vitesse de l'outil et ne sont pas affectées par les changements d'épaisseur mais leur utilisation reste réduite pour des conduites de fortes épaisseurs.
- Les techniques ultrasoniques sont sensibles à la vitesse qu'il faudrait maintenir le plus stable possible et sont peu adaptés aux faibles épaisseurs.

Seule l'expérience du terrain permet de favoriser un procédé par rapport à un autre. C'est pourquoi nous examinerons plus loin un outil de chaque technologie ainsi que l'expérience très intéressante acquise par le pipeliner américain ALEYSKA qui a expérimenté les deux technologies sur une même ligne.

### II.8.3 Evaluation des défauts détectés durant l'inspection

La haute résolution des techniques actuelles d'inspection en ligne, flux magnétique ou ultrason, permet à l'opérateur une évaluation précise de l'intégrité du pipeline. Les équipements basés sur ces techniques peuvent localiser tous les types de défauts le long de la ligne laissant à l'opérateur le soin de décider de la nécessité de procéder à des réparations. Les inspections périodiques par outil intelligent révèlent la présence de nombreux défauts. Ces inspections permettent non seulement la localisation des défauts de corrosion mais également leurs dimensions (qui révèlent leur nature et la sévérité du danger). Le degré de nuisance de certains défauts peut être évalué sur la base de méthodes analytiques relativement simples. Certaines compagnies gazières et pétrolières ont propres codes mais dans une grande proportion tous les opérateurs utilisent la fameuse norme ANSI/ASME B31G.

Pour un contrôle efficace, surtout en présence de corrosion active, une inspection supplémentaire est souvent recommandée. Une inspection répétée permet de préciser le diagnostic mais surtout l'évolution dans le temps des dégradations et donc la possibilité d'une évacuation à long terme de l'état de la conduite. Dans un pipeline corrodé, chaque élément de conduite peut contenir plusieurs centaines de piqûres de différentes dimensions et formes. L'évaluation de l'état de corrosion doit alors se faire sur la base d'un traitement statique. Ce traitement peut être formulé par les uns ou toutes les caractéristiques statiques suivantes :

- Moyenne des pertes de métal ;
- Valeur maximale des pertes de métal ;
- Distribution statique des pertes de métal.[31]



## II.9 Contrôle non destructives (CND)

### II.9.1 Contrôle visuel

Une équipe de contrôleurs expérimentés inspecte ici toutes les surfaces extérieure et intérieure du tube. Ils signalent toutes les anomalies d'aspect ou de forme qui pourront être corrigées, soit meulage, soit par recoupe.

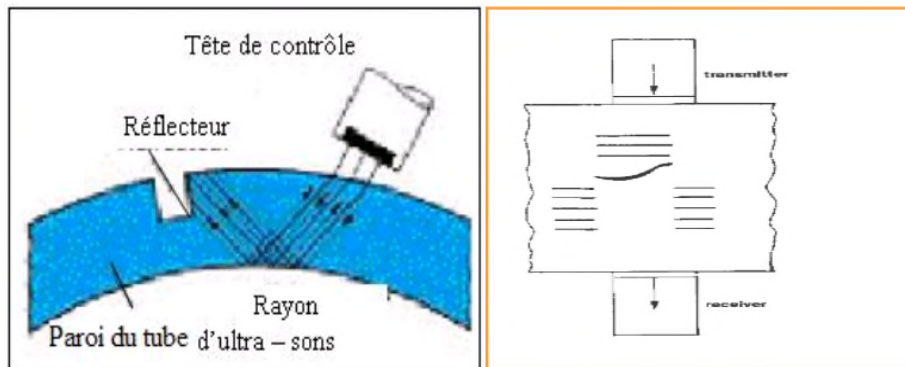
Doivent être décrivant :

- l'état général des surfaces (produits de corrosion, organismes, pollution) ;
- les désordres (nature, localisation et ampleur) ;
- le relevé précis des réparations réalisées antérieurement ;
- les déformations constatées

### II.9.2 Contrôle ultrasonore

Deux bancs de contrôle ultrasonore sont utilisés pour inspecter à nouveau toute la zone soudée. Les appareils installés permettent une recherche très fine des anomalies. Chaque tête de recherche est équipée de 6 palpeurs qui sont réglés en particulier pour détecter les plus fines fissures transversales ou longitudinales.

Les deux bancs de contrôle permettent de réaliser cette opération à vitesse réduite tout en assurant un écoulement normale de la production. Bien entendu la fiabilité des appareils est surveillée à l'aide de plaques étalon immédiatement accessibles.



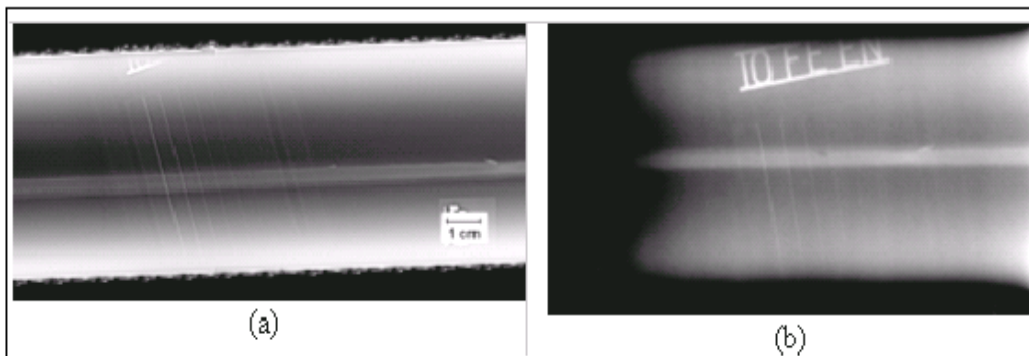
**Figure II.19** : Principe de détection des défauts (Palpeur émission - Palpeur réception) des ondes ultrasonores[33]

### II.9.3 Contrôle radiographique

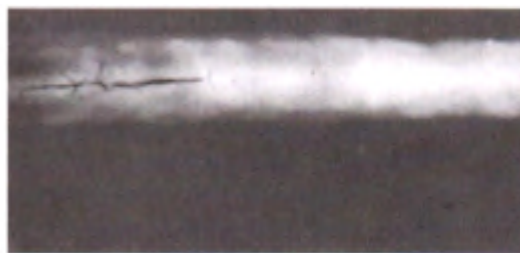
Le contrôle par radiographie est une méthode permettant de détecter les discontinuités à l'externe ou à l'interne en utilisant des rayons X ou de rayons gamma qui pénètre une partie de consulter tous les discontinuités qui produisent une image permanente sur un film. En raison de différence de densité et les différences dans les

caractéristiques d'absorption dues à la variation de la composition, les différentes portions d'un objet d'absorber des quantités différentes de la radiation pénétrante. En général, la radiographie permet de détecter uniquement les éléments qui ont une épaisseur appréciable dans une direction parallèle au faisceau de rayonnement. Ce contrôle est coûteux et dangereux du fait dans les mesures de précaution particulières qui doivent être prises lors de la saisie ou d'approcher un domaine radiographique.

Les examens par radiographie (rayons X) sont très utilisés pour révéler des anomalies volumiques, telles que les pores ou les inclusions de laitier à l'intérieur de la soudure ; par contre (surtout celles qui sont parallèles à la direction des rayons) sont très difficiles à détecter. L'examen par radiographie présente par contre l'avantage de fournir une pièce justificative du contrôle. Ses inconvénients sont qu'il n'est souvent pas possible de radiographier toutes les soudures, qu'il nécessite un appareillage lourd et qu'il représente un risque d'exposition aux rayonnements pour l'opérateur ainsi que pour les personnes présente dans l'atelier.



**Figure II.20:** Radiographie d'une soudure longitudinale sur un tube en acier. [33]



**Figure II.21 :** Radiographie d'une soudure, fissure sous-jacente (38 mm d'épaisseur)

## II.10 Système de protection

La protection, contre la corrosion, des conduites métalliques enterrés est un problème important dont l'intérêt n'échappe à aucun de ceux qui ont la responsabilité de projet, poser ou entretenir ces conduites, en particulier lorsqu'il s'agit de gaz et que

La pérennité de l'installation et non seulement un problème économique mais aussi une question de sécurité dans la protection des ouvrages, on distingue selon le mécanisme de fonctionnement, les protections passives et les protections actives, utilisées l'une et l'autre selon la spécificité de problème ou une protection combinée.

Dans le cas d'une protection passive, le revêtement a pour effet de soustraire le support à l'action du milieu environnant. Il s'agit d'une barrière d'épaisseur variable, neutre vis-à-vis du milieu extérieur et du support.

Dans le cas d'une protection active, le mécanisme de protection place le support dans un domaine de non corrodabilité soit par le revêtement lui-même (revêtement galvanique, cémentation) soit par un système de protection cathodique (PC).

### II.10.1 Protection passive

La protection passive consiste à isoler les structures métalliques par rapport au sol par l'utilisation de revêtement appropriés. Cette isolation permet d'augmenter la durée de vie des installations et de réduire le besoin en courant de protection par coupure de circuit ionique entre le métal et le sol.



Figure II.22 : revêtement polyuréthane PU.(STT)



Figure II.23 : revêtement polyuréthane (usine)

Un bon revêtement doit reprendre eux impératifs suivant :

- Une résistance électrique élevée en vue de s'apposer aux phénomènes électrochimique se produisant entre la paroi de la canalisation et le milieu, elle doit être supérieur à  $10^2 \Omega \text{ m}^2$  ;
- Une étanchéité a l'eau ainsi qu'à la vapeur d'eau afin d'empêcher la pénétration de toute trace d'humidité à travers le revêtement ;
- Une bonne inertie chimique c'est-à-dire résisté avec efficacité à l'action des corps chimiques se trouvant dans les milieux environnant ;
- Une bonne adhérence à la surface du métal à recouvrir pour que les corrosions ponctuelles ne puissent pas se propage ;
- Une bonne résistance aux chocs ;
- Une bonne résistance thermique ;
- Une bonne préparation de la surface. [34]

### II.10.2 Protection active

La protection active consiste à modifier les propriétés électrochimiques de la surface et on particulier son potentiel. Le principe de la protection cathodique consiste à baisser le potentiel de la structure d'acier entrée par rapport à l'électrode de référence cuivre-sulfate de cuivre, a une valeur inférieure à  $-0.85 \text{ V}$  modifiant ainsi les conditions thermodynamiques d'équilibre des réactions ioniques de formation des oxydes de fer. Un revêtement doit donc être complété par une protection cathodique, procédé électrique qui grâce à une modification permanente du potentiel électrique de la canalisation protégé, permis d'arrivé à un arrêt pratiquement absolus, des phénomènes de corrosion.

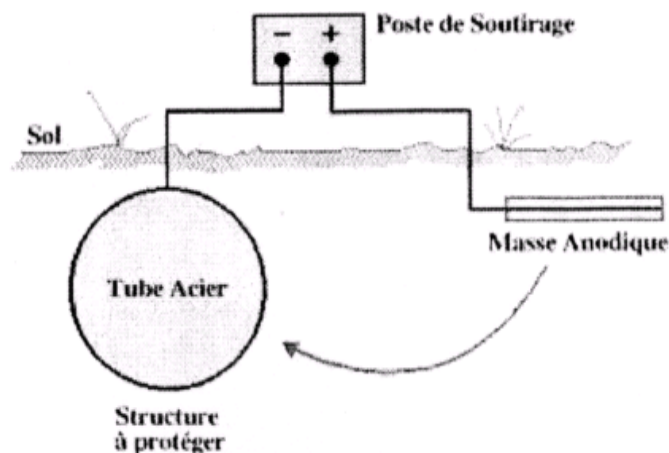


Figure II.24 : principe de la protection cathodique [30]

La protection cathodique est caractérisée par le potentiel pris par la structure protégée, l'intensité de courant de protection et la résistance électrique des éléments du circuit. Dans certains cas, si la mesure du potentiel n'est pas réalisable, il peut être utile de contrôler le courant de protection. Les résultats d'expériences donnent pour l'acier les densités de courant suivantes :

- 5 mA / m<sup>2</sup> pour l'acier nu dans le sol anaérobie sans bactéries ;
- 35 mA / m<sup>2</sup> pour l'acier nu dans un sol aéré ;
- 400 mA / m<sup>2</sup> pour l'acier nu en milieu anaérobie avec bactéries sulfato-réductrices.

### II.11 Historique des défaillances (par outil intelligent)

Les résultats de l'inspection du tronçon qui relie la station de compression SC1 (Timzet) à SC2(OUEDM'SEKA), de la ligne GZ1 par outil intelligent et donnée dans le tableau II.9.

**Tableau II.9** : résultats de l'inspection de la pipe **GZ1 (DRC)**

Numéro de la soudure circulaire	Distance relative (mètres)	Distance absolue (mètres)	Commentaire	Profond. maxi.	Long.	ERF	Orientation (h: min)
10	0,0	1,2					
20	2,1	3,2					
30	2,4	5,7					
	0,9	6,5	*EXT PE	28%	31	0,607	05:45
	0,9	6,6	*EXT PE	21%	42	0,608	06:30
	1,2	6,8	*EXT PE	20%	33	0,606	07:00
35	2,9	8,5					
40	0,1	8,7					
50	2,1	10,7					
60	2,1	12,9	ENT 19.00/15.88MM				
70	3,6	16,5					
	4,8	21,3	EXT PE	16%	23	0,641	06:15
80	7,7	24,2					
90	9,1	33,2					
100	0,5	33,7					
110	4,2	37,9					
120	7,0	44,9					
130	1,6	46,5					
140	12,1	58,6					

150	11,6	70,2					
160	12,0	82,2					
170	11,5	93,7					
180	11,5	105,2					
190	12,1	117,4					
	0,3	117,7	EXT PE	14%	46	0,643	08:00
200	12,0	129,4					
210	11,9	141,3					
220	12,2	153,6					
230	12,0	165,6					
240	11,9	177,5					
250	11,8	189,3					
260	11,8	201,1	ENT 15.88/12.70MM				
270	2,4	203,5	ENT 12.70/11.13MM				
	0,3	203,8	EXT PE	19%	68	0,932	07:15
	0,5	204,1	EXT PE	25%	82	0,949	07:15
	2,5	206,0	EXT PE	11%	130	0,941	07:45
	2,7	206,2	EXT PE	12%	30	0,916	07:30
280	12,0	215,6					
	2,6	218,1	EXT PE	17%	25	0,916	08:00
290	12,2	227,8					
300	12,1	239,8					
	0,4	240,2	EXT PE	10%	28	0,916	12:15
	2,2	242,1	EXT FAB	12%	46		02:00
	2,6	242,4	EXT FAB	8%	35		11:30
	2,8	242,6	EXT FAB	12%	49		10:15
	3,4	243,3	EXT FAB	11%	42		05:45
	3,7	243,5	EXT FAB	10%	48		03:45
	5,4	245,2	EXT FAB	10%	103		03:00
	7,3	247,1	EXT PE	18%	25	0,916	03:30
	7,5	247,3	EXT PE	12%	35	0,917	03:15
	7,5	247,4	EXT PE	15%	21	0,915	03:30
	7,6	247,5	EXT PE	16%	14	0,914	03:45
	7,9	247,7	EXT FAB	8%	45		09:15
	8,0	247,9	EXT PE	19%	45	0,923	03:30
	8,2	248,0	*EXT PE	31%	25	0,919	03:15
	8,3	248,1	EXT PE	20%	41	0,922	03:30
	8,4	248,2	EXT PE	18%	32	0,918	03:45
	8,6	248,4	EXT PE	10%	27	0,915	03:45

310	12,0	251,8					
320	11,9	263,7					
	0,5	264,2	EXT PE	12%	33	0,917	09:30
330	12,2	275,9					
	1,6	277,5	EXT PE	11%	30	0,916	02:45
	11,3	287,2	EXT PE	13%	39	0,918	02:45
340	11,9	287,8					
	11,4	299,2	EXT PE	12%	49	0,920	02:00
350	12,0	299,8					
360	10,5	310,3					
370	12,1	322,4					
	1,0	323,4	EXT PE	11%	54	0,920	08:45
	2,7	325,1	EXT PE	10%	29	0,916	08:30
	11,1	333,5	EXT PE	13%	49	0,921	08:30
380	11,9	334,3					
390	12,1	346,4					
400	12,2	358,6					
410	12,1	370,6					
420	12,1	382,7					
430	9,6	392,3					
	11,6	403,9	EXT PE	16%	53	0,923	02:15
	12,0	404,3	EXT PE	10%	41	0,917	02:15
440	12,1	404,4					
	10,7	415,1	EXT PE	7%	32	0,915	08:15
450	12,0	416,4					
	1,2	417,6	EXT PE	11%	23	0,915	08:15
	4,2	420,6	EXT PE	9%	32	0,916	03:15
	4,5	420,9	EXT PE	12%	32	0,917	04:00
460	12,1	428,4					
	0,4	428,8	EXT PE	10%	190	0,949	10:30
470	12,0	440,5					
480	12,0	452,5					
	5,2	457,7	EXT PE	13%	18	0,915	03:45
	11,8	464,3	EXT PE	10%	91	0,927	03:45
	11,9	464,4	EXT PE	13%	42	0,919	02:30
490	12,2	464,7					
	3,8	468,5	EXT PE	10%	24	0,915	03:00
	5,3	470,0	EXT PE	8%	26	0,915	04:00
	5,4	470,1	EXT PE	12%	50	0,920	03:30

## II.12 Procédés de réparations

### II.12.1 collage par patch

#### II.12.1.1 Définition

Au cours de leur exploitation, les pipelines sont confrontés à divers endommagements résultant d'impacts, de défauts de fabrication ou tout simplement dus au vieillissement de la structure. Ces endommagements peuvent apparaître sous forme de fissures de fatigue, de délaminages, de formation de corrosion,...

Pour prolonger la durée de vie de ces structures, les ateliers de maintenance les réparent en disposant des patchs composites ou métalliques au niveau des zones endommagées. Cette dernière solution, consistant à riveter une plaque métallique sur la zone endommagée. Une solution alternative consiste à utiliser un patch composite collé. Ces patchs peuvent servir non seulement à réparer mais aussi à renforcer préventivement des zones qui ont été sous-dimensionnées lors de la conception la géométrie du patch, figure II.25 et II.26.[35]

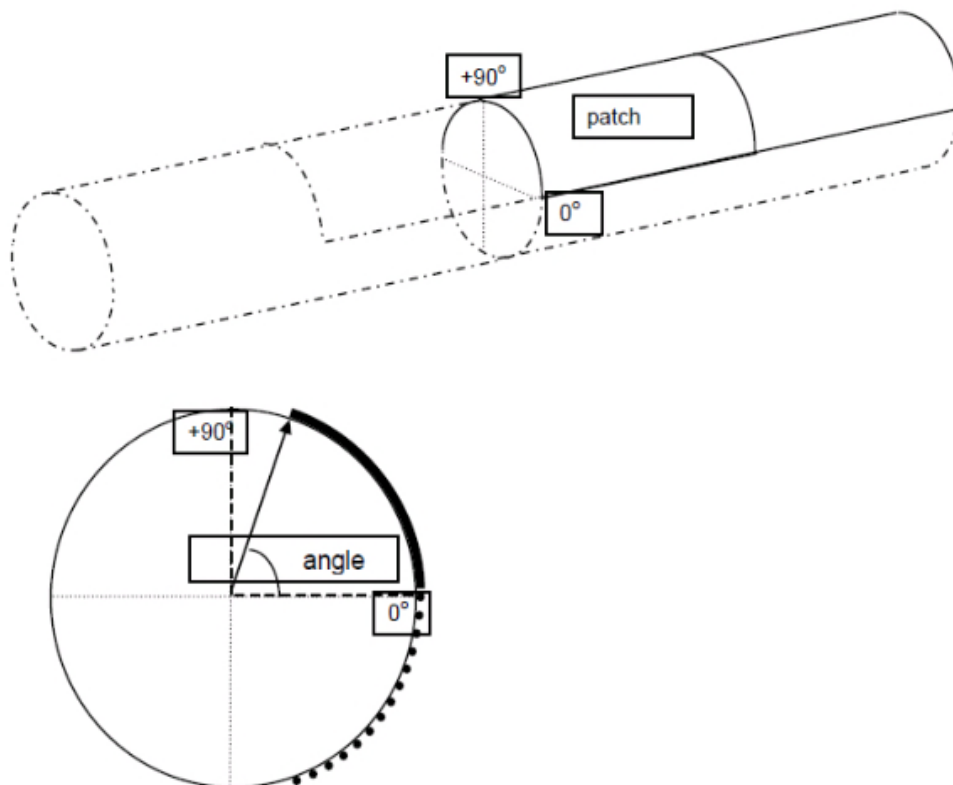
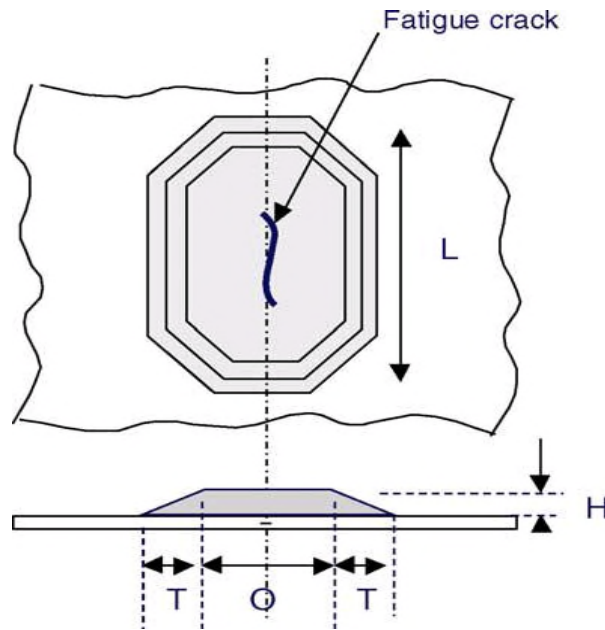


Figure II.25 : la géométrie d'un collage par patch d'une pipe[36]





**Figure II.26:** Dimensions principales de patch : **L** est la longueur de patch, **H** est la taille, **O** est longueur de chevauchement, la longueur au-dessus dont patch est pleine épaisseur et **T** est la longueur de cône.[37]

### II.12.1.2 Avantage de collage par patch

La réparation par composite patch collée offre beaucoup d'avantages par rapport aux méthodes traditionnelles de réparation telles que le patch boulonnées et les plats soudés :

- La réparation par patch évite les températures de la soudure et de la nécessité suivante d'arrêter toutes les machines à proximité. Ceci réduit les retards et les coûts élevés.
- Patch composites peuvent être facilement enlevées pour regarder le secteur dessous et l'effet sur les dommages et être alors réappliquées au secteur.
- Patch composites peuvent être appliquées aux formes peu orthodoxes car elles sont plus aisément formable que d'autres matériaux.
- Les matières composites ont moins d'effet sur le poids et le poids distribution.
- Patch composites ont la capacité de sceller des fissures et d'autres sources de dommages.
- Moins de compétence est exigée pour appliquer patch par rapport à la compétence et aux qualifications exigées pour la soudure.
- Patches sont non conducteurs, leur permettant d'éviter la corrosion galvanique.
- Composites ne corrodent pas et ne se rouillent pas à la différence patch métalliques.[37]

### II.12.1.3 Zones critiques de patch

La forme de patch peut être divisée en trois zones critiques suivant les indications de la figure II.27, Ces zones sont décrites dans le tableau II.10.

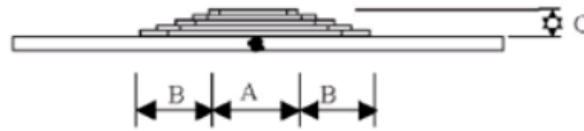


Figure II.27:Zones critiques de patch

Tableau II.10: Description des zones critiques[37]

zone	Paramètre principale	Description
<b>A</b>	renforcement structural	la longueur de chevauchement et la taille de la zone est exigée pour assortir la rigidité globale de la structure métallique, c.-à-d. cette zone porte tout le chargement de structure de patch.
<b>B</b>	Longueur de chevauchement	la longueur de chevauchement est une fonction de taille de patch (la zone c) et son rôle primaire est au minimise que la peau souligne aux extrémités de patch, bien qu'elle contribue au renforcement global à la structure.
<b>C</b>	Taille de patch	la taille de patch est déterminée en assortissant le rapport de rigidité/épaisseur de l'acier avec la réparation composée.

### II.13 Clockspring

Les compagnies d'exploitation de pipelines peuvent périodiquement trouver des défauts dans leurs canalisations pendant les inspections et l'opération normale et l'entretien. Le défaut a pu avoir été provoqué par des dommages d'excavation, la corrosion, des erreurs de construction, ou le processus de fabrication. Des manchons ou les brides en acier de réparation ont été typiquement utilisées pour réparer des dommages de canalisation ou des défauts ou la section endommagée ont été arrêtés et remplacés. Une fois correctement appliquée le manchon composé de clockspring reconstitue la canalisation à la condition de fonctionnement sûre sans devoir arrêter et remplacer la canalisation. Les manchons composées de clockspring sont utilisées pour

dépanner provisoires et permanents sur le gaz naturel et les canalisations liquides. La phase d'installation de clockspring (annexe 5) selon les figures II.28 et II.29. [38]

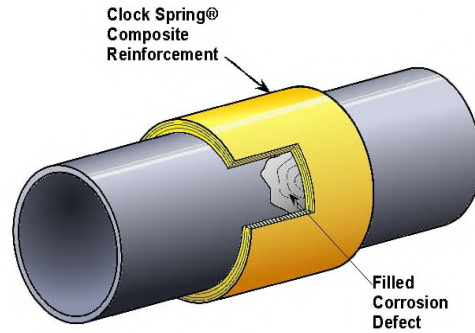


Figure II.28 : clock spring (corrosion)

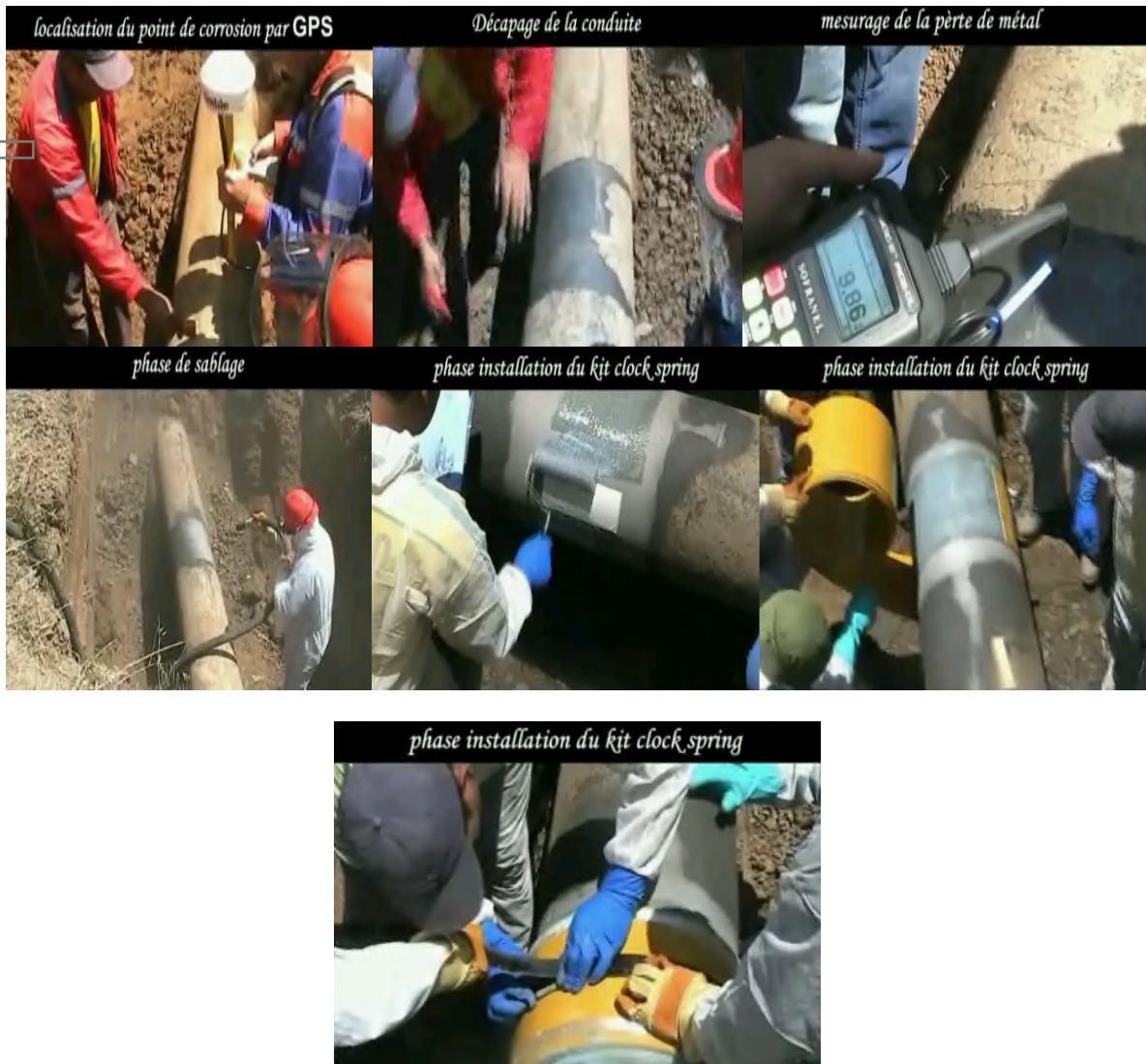


Figure II.29 : installation de clockspring(STT)

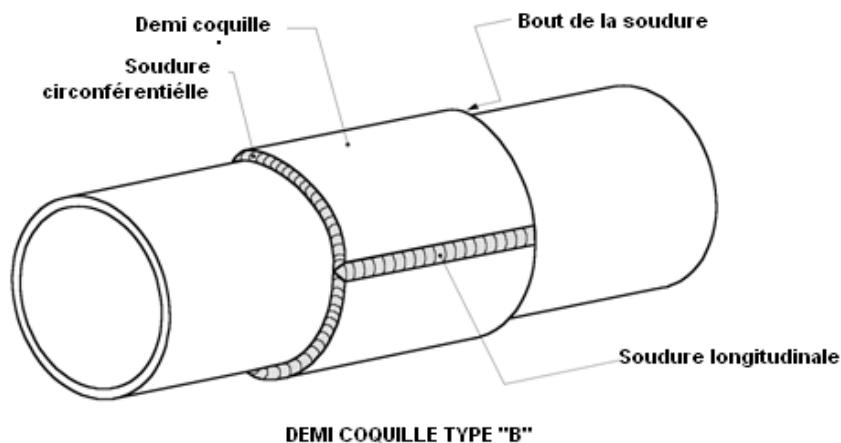
La qualité de l'activateur pour l'adhésif de clocksprine se définit sur le tableau suivante :

**Tableau II.11:**Qualité d'activateur pour l'adhésif[39]

température d'installation c°	quantité d'activateur (g)					approximatif	
	quantité adhésive (g)					temps de travail (minutes)	temps de traitement (heures)
	650	1200	1700	2400	3000		
0	80	150	215	300	380	45	2.5 - 3
10	65	120	175	245	310	45	2.5 - 3
21	50	95	135	190	240	45	2.5 - 3
27	40	75	105	145	180	45	2.5 - 3
32	35	70	95	135	170	35	2 - 2.5
38	35	60	90	120	150	23	1.5 - 2
43	35	60	85	120	150	22	1.5 - 2
49	35	60	85	120	150	21	1.5 - 2

**II.14 Réparation par demi-coquilles soudées**

La procédure de réparation en charge des canalisations de transport d'hydrocarbures par l'installation de demi-coquilles soudées à encerclement total. Les demi-coquilles soudées à encerclement total, également connues sous le nom de demi-coquilles de type B, renforcent la zone défectueuse et contiennent toute éventuelle fuite, et sont par conséquent utilisées pour réparer des défauts débouchant ou non-débouchant d'orientation axiale ou circonférentielle (annexe 6).[40]



**Figure II.30:** géométrie de demi-coquilles[40]

Les demi-coquilles soudées permettent de réparer les défauts suivants :

- Corrosions internes et externes ;
- Enfoncements simples ou combinés à d'autres défauts ;
- Entaille et rayures ;
- Fissures au niveau du corps du tube ou du cordon de soudure circonférentiel.



**Figure II.31:**Opération de soudages de demi coquilles(STT)

### **Revetement :**

- Appliquer sur la surface extérieure des demi-coquilles soudées une couche de revêtement compatible avec le revêtement de la ligne.
- Contrôler au balai électrique le revêtement ainsi appliqué.

### **II.15 Choix de la nature de la réparation**

- Géométrie de la canalisation (diamètre, cintrage, ...)
- Nuance de l'acier
- Localisation de la canalisation
- Conditions de l'exploitation
- Localisation du défaut
- Nature de dimension du défaut.

### Conclusion

Les aciers pour gazoducs se développent de jour en jour, et la modernisation de fabrication des aciers en augmentant les propriétés tel que la résistance de ces derniers nous a donnée des aciers plus perforant. Les principales caractéristiques des aciers pour les tubes HSLA sont leur très haute résistance à la rupture et leur excellente ténacité à très basse température pour les aciers de forte épaisseur. De plus ces qualités présentent une bonne aptitude au soudage obtenu grâce à une composition chimique adaptée. La régularité des caractéristiques mécaniques des aciers API destinés à la fabrication de gros tubes soudés facilite les opérations de formage et de soudage.

La ligne GZ1 du gaz naturel est parmi les première en Algérie d'où la dégradation des pipelines, donc on a pris un tranchant de cette ligne et après fait un contrôle par la direction de réparation des canalisations (DRC) par un outil de détection des défauts (outil intelligent), après faire des réparations par différent méthodes (collage par patch, clock spring,...).



Copie interdite

***CHAPITRE III***  
***MATERIEL ET METHODES***

## Introduction

Les tubes enterrés en aciers des canalisations d'hydrocarbures sont exposés à des risques de défaillances particulièrement d'interactions de type corrosion lorsque les systèmes de protection présentent des défauts donnant lieu à des défaillances entraînant des arrêts d'exploitation de la ligne de pipeline et qui exige des réparations. Ces défaillances dans les pipelines se développent beaucoup plus en surface sous forme de corrosion ou de fissuration et se manifestent par l'apparition des pics de corrosion (pitting corrosion) et la propagation des fissures (cracking corrosion), (Annexe 8). Les facteurs impliqués sont nombreux. Ils peuvent de nature chimique, électrochimique, mécanique ou biologique rendant le phénomène d'endommagement plus complexe.

Les traitements envisagés sont particulièrement des traitements de surfaces qui sont des opérations mécaniques, chimiques, électrochimiques ou physiques qui ont pour but la réparation ayant pour conséquence de modifier l'aspect ou la structure de la surface des matériaux, afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données.

Le but des traitements de surface est fort variable : ils peuvent tendre à améliorer les propriétés optiques (ou l'aspect esthétique), la résistance à la corrosion, la tenue de surfaces soudées, la conductivité, les propriétés mécaniques, la résistance au frottement et à l'usure. Ces traitements permettent d'améliorer les propriétés superficielles du matériau afin d'augmenter sa résistance aux sollicitations rencontrées (frottement, érosion, corrosion,...) et donc sa durée de vie. Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie , c'est-à-dire de la mécanique de contact.

Les objectifs des traitements de surface peuvent être définis comme une opération ou plutôt comme un ensemble d'opération sur un métal pour obtenir les trois finalités suivantes :

- une surface propre, c'est-à-dire débarrassé de toutes ses souillures comme les huiles et les graisses ou encore les oxydes métalliques.
- Une surface protectrice vis-à-vis du milieu extérieur car les aciers en général, comme nous l'avons vu, sont sujets aux phénomènes d'oxydation et de corrosion.il faut préserver le métal des altérations susceptibles de se produit à tout moment.
- Une surface homogène pour qu'elle reçoive le revêtement de finition qui lui est destiné (le plus souvent une peinture).

On s'est intéressé dans ce travail à étudier les traitements mécaniques par sablage utilisés dans la réparation des tubes corrodés en acier API 5L X60 de la ligne GZ1 conçue pour transporter le gaz naturel. Cette opération s'effectue sur une machine de sablage ayant les caractéristiques suivantes :

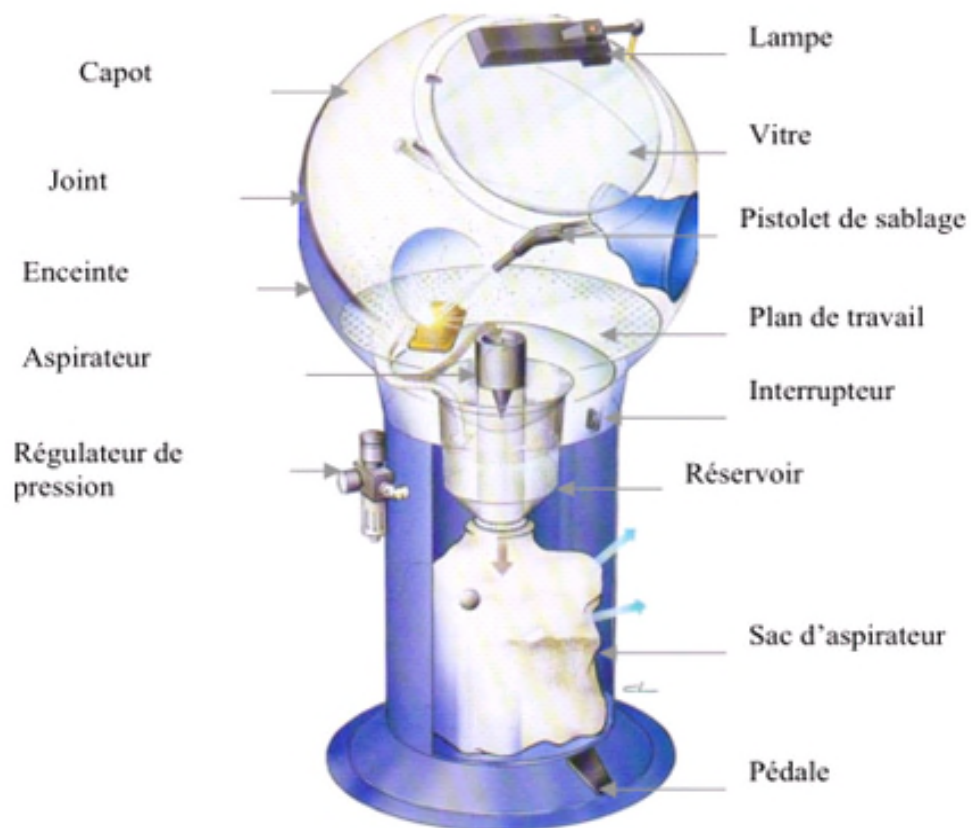
- Caractéristiques du sable (composition chimique, propriétés mécaniques, dimension du grain...
- Vitesse de projection du sable



- Temps de projection
- L'angle d'impact ou de projection
- Diamètre de la buse de projection
- Température

### III.1 Machine de sablage

La machine de sablage, conçue pour réaliser des traitements de surface par impacts de sable, est équipée d'une colonne d'aspiration, dépeussierage qui assure un triage abrasif-poussière. La poussière est stockée dans un sac muni d'un filtre lié à cette colonne (figure III.1). Les caractéristiques techniques de cette machine représentent dans le Tableau III.1.



**Figure III.1** : schéma de la machine de sablage type Blaster 2700.[42]

**Tableau III.1** : Caractéristiques techniques de sableuse

Poids	50 Kg
Hauteur totale	1500 mm
Hauteur de la chambre de sablage	400 à 550 mm
Diamètre de la sphère	700 mm
Diamètre de la buse du pistolet	8 mm
Diamètre de la chambre de sablage	450 mm
Consommation d'air	500 l/min
Contacteur de sécurité d'arrêt porte ouverte	Réglable
Pression d'alimentation	1 à 10 bars
Alimentation de l'abrasif est réalisée par	Effet venturi

L'air est comprimé à l'aide d'un compresseur. Il peut être à vis ou pistons d'une puissance suffisante afin d'obtenir un débit d'air et une pression de service en relation avec le diamètre de la buse et la qualité de l'abrasif utilisé.

En pratique :

1) On compte 125 l/min d'air par cv de moteur électrique utilisé. Ceci pour une pression de 7 atmosphères.

Exemple :  $40 \text{ CV} \times 125 = 5000 \text{ l ou m}^3/\text{min}$ .

NB : 45 CV constituent un minimum pour le sablage.

2) Le diamètre intérieur des tuyaux doit être triple ou quadruple du diamètre de la buse.

En générale, de 32 mm sans diminution aux raccords pour éviter les turbulences.

Les machines de sablage sont classées selon les critères suivants (tableau III.2):

**Tableau III.2:** Critères du classement des machines de sablage.

Qualité	Prix	Exigences de problème
-Longue durée de vie -Garantie -Moins encombrante -Moins lourde -Possibilité de déplacement -Confort de travail -Sécurité -Étanchéité	- Coût de la machine - Coût d'entretien - Machine et pièce de rechange disponible sur stock	- Réglage des paramètres : <ul style="list-style-type: none"> <li>• pression,</li> <li>• débit constant,</li> <li>• ...etc.</li> </ul>

## III.2 Caractéristiques du matériau abrasif

On distingue plusieurs types d'abrasifs :

- **Les sables siliceux naturels**

Qui ne peuvent plus guère être employés qu'en sablage humide ou en appareils clos selon le décret de 1969, silex, grès,...[41]

- **Les non-siliceux**

Dits à jet perdu bien qu'ils soient recyclables 1 à 3 fois.

Carbonate de calcium.

- **Les non-siliceux recyclables**

Sisco, corindon (brun et blanc), grenaille, bille de verre, carbure de silicium, bille de céramique.

### III.2.1 Choix du grain

#### La forme

La forme de la cuvette imprimée par l'abrasif dans le métal ainsi que les bords de cette cuvette sont déterminés par la forme du grain.

**Rond**, il agit par martelage et donne un profil atténué formant des vaguelettes.

**Angulaire**, il creuse des cratères et détermine un profil rugueux.

A titre exemple un grain rond conviendra au traitement de métaux tendres dont il colmatra les pores alors que l'angulaire s'y ficherait. Ce dernier s'appliquera aux nécessite d'une bonne surface d'accrochage pour certaines technique de revêtement.

#### Calibre

Pour que le métal soit parfaitement décapé, il doit y avoir superposition des impacts. Lorsque la surface initiale a totalement disparu on emploie l'expression « décapage a blanc ».

L'espacement entre les empreintes est fonction de la multiplicité de frappe, donc du calibre. Notons immédiatement que la vitesse de déplacement des pièces ou l'insistance au passage sont de nature à compliquer l'appréciation.

A vitesse constant c'est la masse, donc la grosseur de l'abrasif qui détermine la profondeur des cuvettes.

### III.2.2Caractéristiques de l'abrasif utilisé (Corindon $Al_2O_3$ )

#### III.2.2.1 Définition

On appelle Corindon, l'alumine ( $Al_2O_3$ ) dans sa phase haute température, issue d'une transformation réversible de l'état solide à l'état liquide. Pour réaliser cette transformation de phase dont le but est l'obtention à l'échelle macroscopique d'un monocristal d'alumine. La fusion à haute température, dans un arc électrique suivi d'un refroidissement lent, s'est rapidement imposée comme le moyen industriel le plus

économique. Plus généralement, les corindons représentent une famille d'alumines électro-fondues que l'on peut scinder en trois grands groupes :

1. Les corindons blancs (alumine pure)
2. Les corindons bruns (alumines dopées à 1.5% ou 3% de  $TiO_2$ )
3. Les solutions solides à matrices de corindon parmi lesquelles nous pouvons citer les corindons zircone (alumine à 25% et 42% de zircone) et les oxynitrures d'aluminium (AlON).

Dans la nature, le corindon est le minéral le plus dur après le diamant. Il est de plus chimiquement inerte et plus ou moins fragile selon sa préparation. Le corindon a toujours été un abrasif polyvalent et reste le plus utilisé aujourd'hui.

On l'utilise également comme agrégat dans les réfractaires pour sa résistance mécanique à chaud, sa stabilité dimensionnelle, son inertie chimique et son coefficient de frottement élevé.



**Figure III.2:** Photographie du corindon brun, blanc et semi-friable respectivement. [43]

### III.2.2.2 Propriétés et composition chimique du corindon

La ténacité du corindon brun est plus élevée que celle du corindon blanc. Concernant la morphologie, les grains de corindon brun sont massifs (isométriques), alors que ceux du corindon blanc sont aigus et coupants. Les propriétés physiques et mécaniques du corindon sont présentées par les tableaux III.3 et III.4, et composition chimique tableau III.5. [43]

**Tableau III.3:** Propriétés physiques du corindon

Composition atomique $Al_2O_3$	>99,9%
Densité [ $g/cm^3$ ]	3,95
Taux d'absorption d'eau (%)	0

**Tableau III.4:** Propriétés mécaniques du corindon à 20°C.

Dureté Vickers (HV)	180-200
Résistance à la traction (N/mm <sup>2</sup> )	200-250
Résistance à la flexion (N/mm <sup>2</sup> )	200-600
Résistance à la compression (N/mm <sup>2</sup> )	1900-2000
Module d' Young (N/mm <sup>2</sup> )	3.8 10 <sup>5</sup>
Coefficient de Poisson	0.25-0.3
Facteur d'Intensité de Contraintes : K <sub>IC</sub> (Mpa.m <sup>1/2</sup> )	4-5

**Tableau III.5:** composition chimique du corindon [44]

Elément	%
Na2O	0.93
MgO	2.01
Al2O3	25.2
SiO2	52.8
P2O5	0.64
K2O	3.55
CaO	5.22
TiO2	1.63
V2O5	0.05
Cr2O3	0.03
Fe2O3	7.69
NiO	0.01
CuO	0.02
LOI	0.62
Sulphur SO3	0.023

### III.3 Caractéristiques du sablage

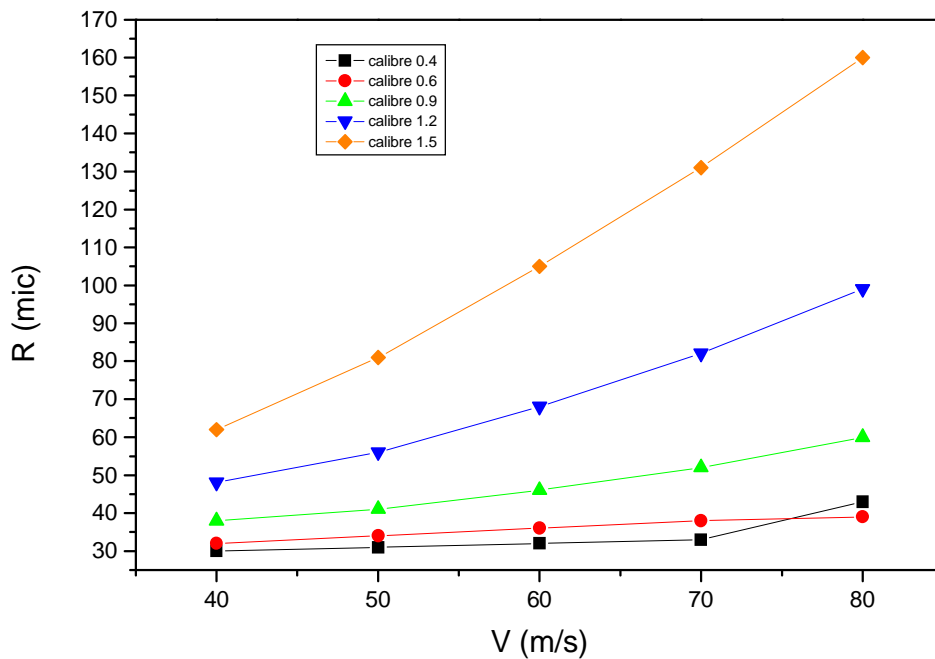
#### III.3.1 vitesse projection

L'importance du refoulement est d'autant plus grande que la force vive du projectile est élevée et c'est là qu'intervient l'importance de la pression débitée par l'installation d'air comprimé.

Le tableau III.6 résume bien l'influence des deux derniers facteurs. Il donne une idée valable de l'importance de la rugosité en fonction de la variation du calibre de l'abrasif et de sa vitesse (figure III.3).

**Tableau III.6:** importance de la rugosité en fonction de la variation du calibre de l'abrasif et de sa vitesse

Calibre moyen en mm	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	
Poids en mg	0.391	1.33	4.55	10.65	20.70	
Vitesse en m/s	Rugosité totale en microns					
	40	30	32	38	48	62
	50	31	34	41	56	81
	60	32	36	46	68	105
	70	33	38	52	82	131
	80	43	40	60	99	160



**Figure III.3:** la variation de la rugosité en fonction de la vitesse

Il est évident que l'on ne saurait utiliser des pressions sans tenir compte des caractéristiques des abrasifs sous peine de quelque gâchis. Si les impératifs de rendement et le matériel moderne incite parfois aux pressions élevées, on obtiendra néanmoins le rendement optimum par l'observation de normes raisonnables :

- 1 à 4 bars pour CORIMDON
- 5 à 7 bars pour le RUGOS « 2000 »

Il ne sera donc pas superflu de prévoir l'adjonction d'un manomètre après la vanne ou le détendeur sans oublier que la perte de charge paramètre linéaire de flexible est d'environ 0,2 à 0,25 bar.

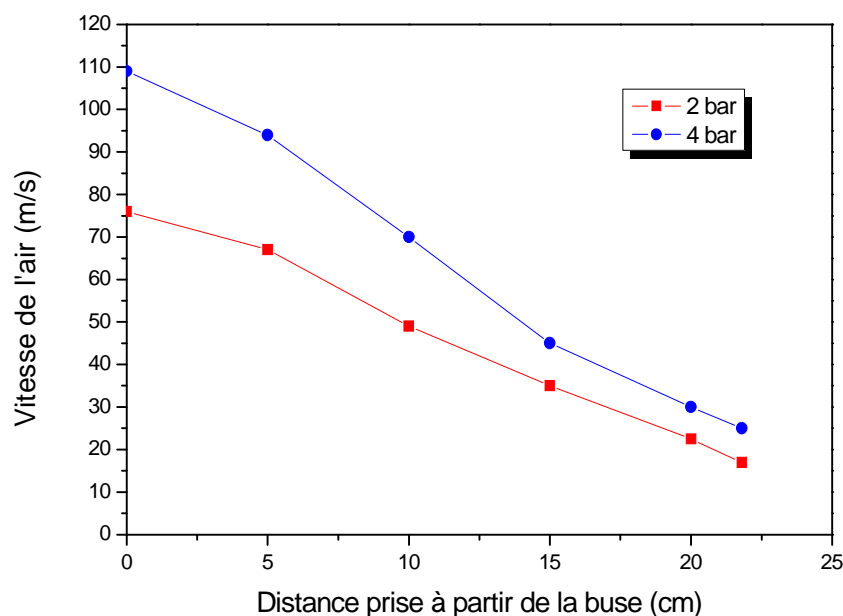
### III.3.2 Mesure de la vitesse des particules du corindon

Il a été rapporté dans la littérature que la vitesse des particules peut être mesurée selon différentes méthodes :

- Photographie à vitesse élevée (High speed photography) ;
- Double disque rotatif (Double rotating disks) ;
- Méthode numérique (numerical method).

Toutes ces méthodes concernent les conditions de l'essai à des vitesses élevées, généralement supérieures à 100 m/s.

Les vitesses du flux d'air, pour l'air comprimé à 2 et 4 bars, ont été mesurées à l'aide d'un anémomètre. La figure III.4 présente la variation de la vitesse du flux d'air en fonction de la distance prise à partir de la buse de sortie. Dans notre cas, la vitesse mesurée à 200 mm de la buse, pour une pression de 4 bar, est d'environ 30 à 35 m/s, laquelle représente une vitesse moyenne du vent de sable dans la nature particulièrement dans les régions sahariennes.



**Figure III.4:** Variation de la vitesse du flux d'air en fonction de la distance.

### III.3.3 Angle de projection

L'angle de projection est défini comme l'angle entre la surface à traitée et la trajectoire des particules. Si les particules sont en mouvement parallèle à la surface, l'angle d'impact est presque  $0^\circ$  et seulement une légère érosion peut avoir lieu. Lorsque les particules se déplacent selon la normale à la surface, l'angle de projection est de  $90^\circ$ . Le jet abrasif ne doit pas être perpendiculaire à la surface traitée car les grains rebondissent et provoquent une baisse de rendement avec une tendance accrue à la cassure. L'attaque doit être de biais avec une inclinaison optimum vers  $45^\circ$  (figure III.5).

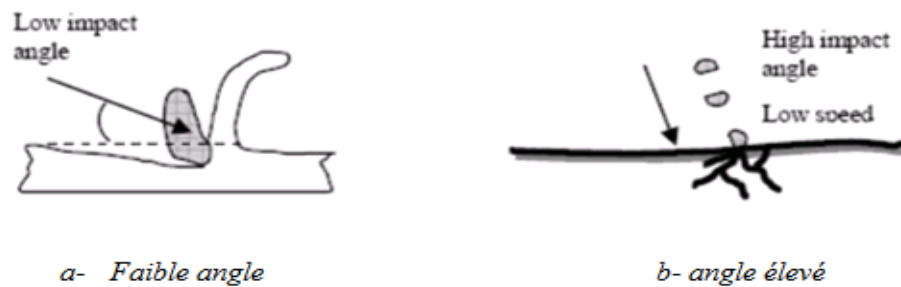


Figure III.5: angle de projection (impact)[43]

### III.3.4 Les buses

Plus la buse est longue, plus le cône de protection est serré et la distance entre la buse et la pièce peut être augmentée d'autant.

L'expérience a montré qu'une buse de 100 mm de long donne les meilleurs résultats à une distance d'environ de 30 cm.

Le diamètre doit être approprié d'une part à la grosseur du grain utilisé, d'autre part à la forme des pièces traitées. Pour les grandes surfaces on obtient les meilleurs résultats en utilisant des buses de 8 et 10 mm de diamètre. Les surfaces étroites, longues, minces, etc., demandent un sablage plus concentré, soit une buse de 6 mm.

Pour déterminer le diamètre interne de la buse on appliquera une vieille règle, à savoir :

**4 fois le grain le plus grossier en mm = diamètre minimum**

#### Exemple :

Avec un grain de 1.4 mm on devra utiliser une buse d'alésage minimum de  $1.4 \times 4 = 5.6$  soit 6 mm.

En appliquant cette règle fondamentale on évitera tout engorgement.

### III.3.5 Etat de surface



Structure de la surface, la rugosité et la mouillabilité sont parmi les facteurs importants qui déterminent l'interaction entre les implants et les tissus environnants. La qualité d'un état de surface (figure III.6, III.7) relève principalement de deux facteurs :

- Le pourcentage de recouvrement (multiplicité des impacts sur la surface initiale)
- La rugosité totale ou  $R_t$ .

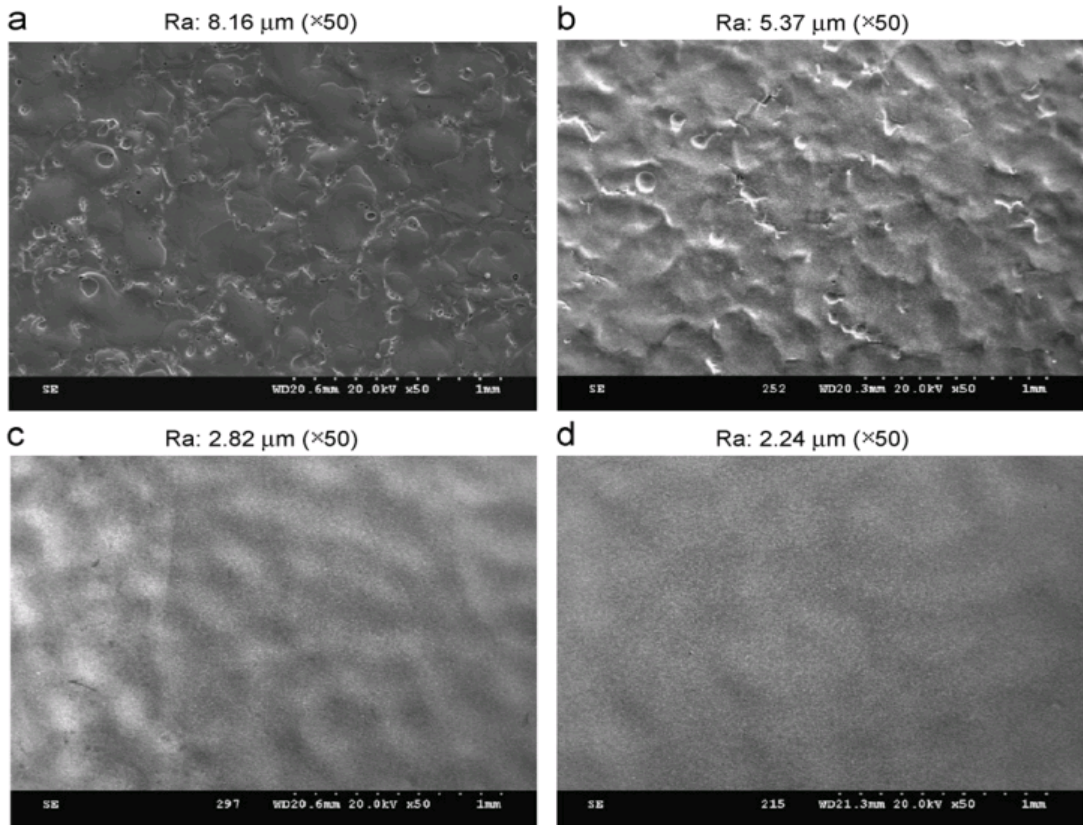


Figure III.6 : micrographies montrant une amélioration de la rugosité de surface : a=0 min, b= 1min, c=10 min et d=40min.

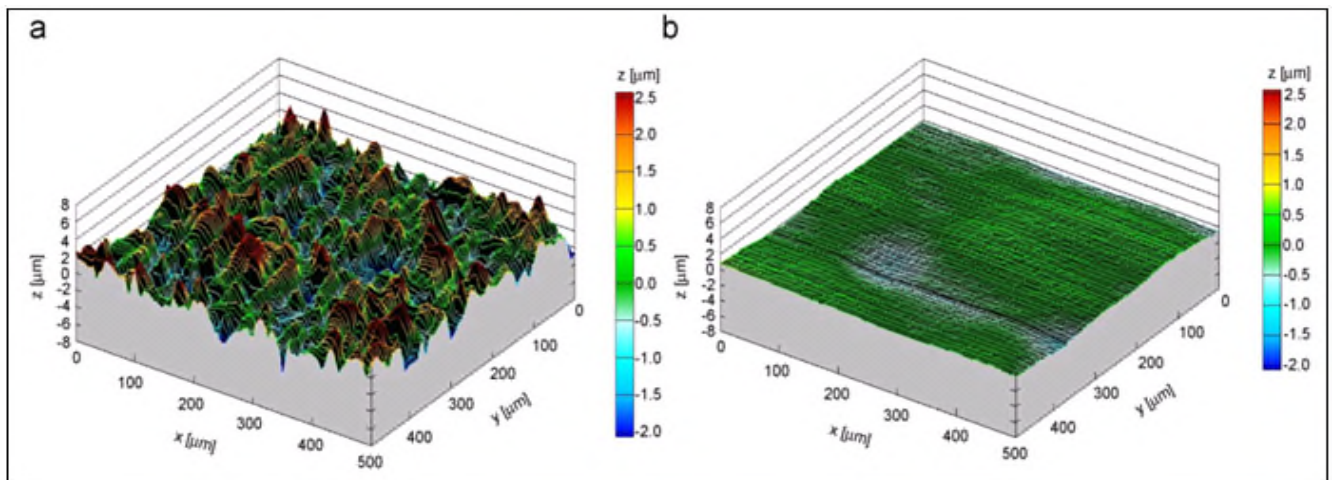


Figure III.7 : 3-D profils de rugosité de surface avant et après sablage : (a :  $R_a = 1.03\mu m$ ;  $R_{max} = 7.74\mu m$ ), (b :  $R_a = 0.13\mu m$ ;  $R_{max} = 0.90\mu m$ ). [45]

Il existe différents appareils de mesure très coûteux notamment utilisés en laboratoire. Au stade de l'atelier on mesure par comparaison avec des surfaces étalonnées reproduits par photographies ou sur métal inoxydable :

- Le degré de soin, par sablage, s'exprime en «Sa» suivantes les normes Suédoises SIS 05.59.00-1967, reprises par l'ISO 8501-1 de 1988.
- La rugosité s'exprime en Ra suivant la pratique du rugotest.

A titre indicatif, nous donnons certaines appréciations en regard des granulométries usuelles. Nul n'oubliera, entre autre, que l'état de surface est tributaire de l'état initial des pièces à traiter dont les degrés de rouille et de calamine s'expriment en 4 nuances A-B-C-D (normes suédoises reprises en ISO).

**Tableau III.7:** la variation granulométrie en fonction de pression et diamètre de buses

Granulométrie (mm)	Pression (bar)	Buse (mm)	Etat de surface
2.3 à 1.42	3.5 - 4	10 - 8	Gravée-décapée
1.15 à 1	3	8 - 6	Rugueuse
0.75 à 0.54	3	6	Granulée
0.54 à 0.34	3	6	Dépolie
0.24 environ	2	6 - 5	Satinée
0.18 environ	1.2	5	Très douce

### III.3.6 Distribution de la taille des grains

Le taux de déformation d'acier dépend fortement de la forme des particules érosives. En général, dans les mêmes conditions d'essai et pour une même taille, les particules anguleuses causent une dégradation plus importante que celles des particules arrondies. La forme anguleuse est difficile à définir en raison de la difficulté de l'identification et de la quantification des caractéristiques géométriques en trois dimensions.

Toutefois, l'angularité des particules est mesurée quantitativement par une technique simple basée sur la mesure des longueurs extrêmes de la particule  $L_g$  et  $l_g$ , Figures III.8 et III.9. Ce facteur noté  $(F_s = L_g/l_g)$  correspond au rapport entre la plus grande dimension  $L_g$  mesurée dans une direction et la dimension la plus grande  $l_g$  mesurée dans la direction perpendiculaire.

Dans notre cas, le rapport de forme de grains se situe entre la valeur 1,5 et 1,7. Ceci signifie qu'une bonne partie des grains ont une forme anguleuse. La figure III.10 illustre la distribution de la taille des grains du corindon brun. Nous remarquons que la taille moyenne est comprise entre 300 et 400  $\mu\text{m}$ .

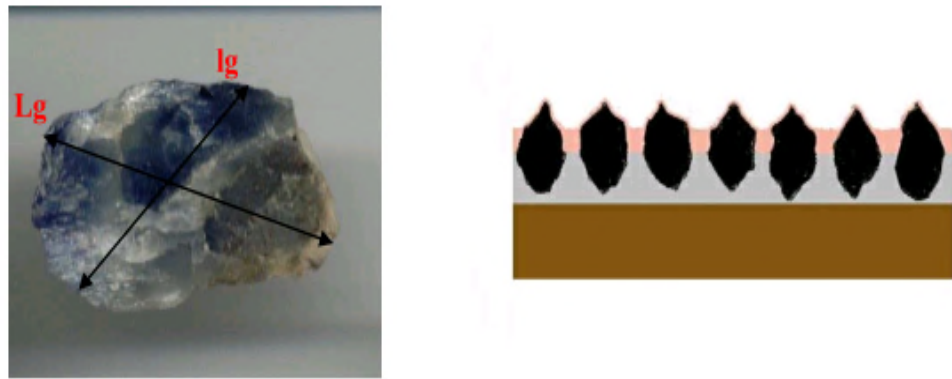


Figure III.8: Forme des grains du corindon.[43]

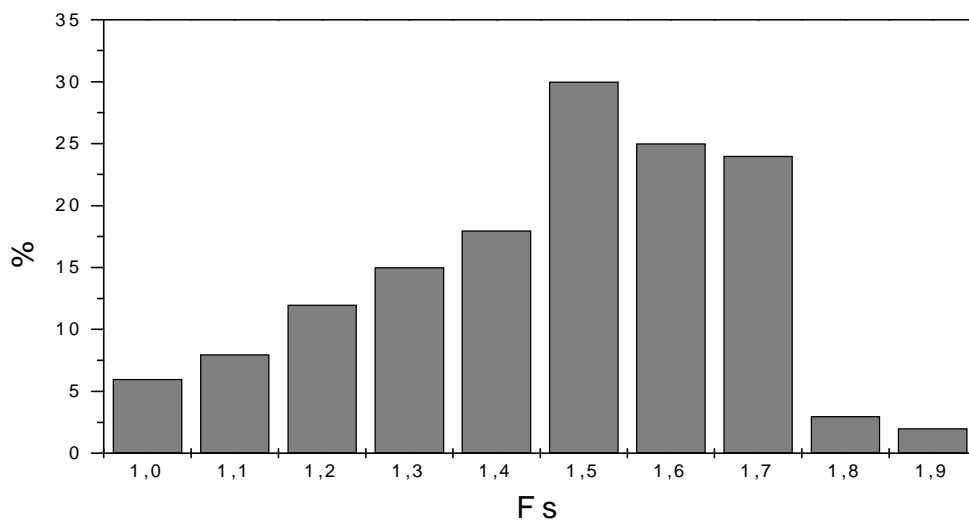


Figure III.9: Facteur de forme des particules du corindon brun utilisé

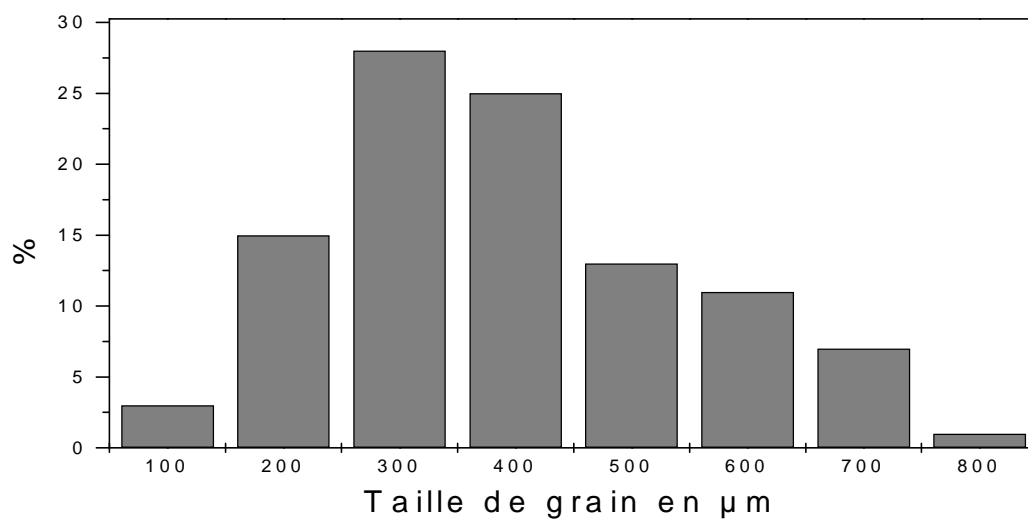


Figure III.10 : Distribution de la taille des grains du corindon brun utilisé

### III.4 Essai de sablage

Les essais mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes en acier API 5L X60 prélevées dans un tuyau dans les deux sens, Figure III.11. Ce tuyau est de diamètre extérieur 610 mm et d'épaisseur de 12,7 mm.

- Sens longitudinal (L)
- Sens transverse (T)

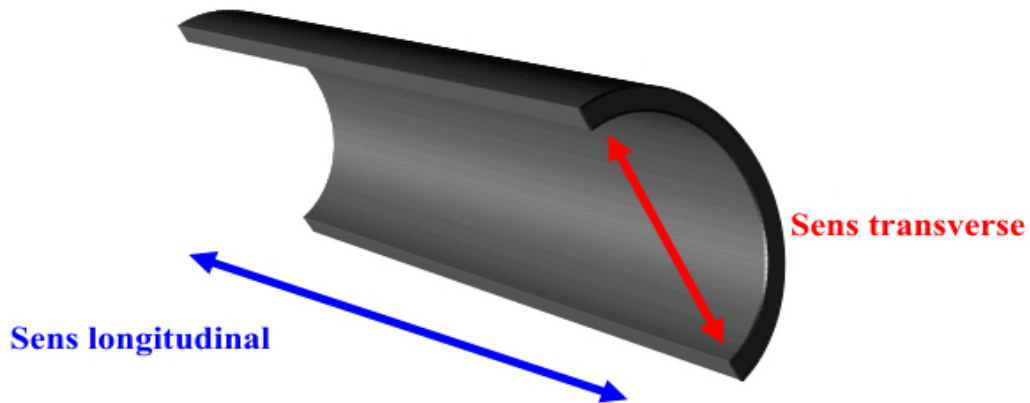


Figure III.11: Sens longitudinal et transverse du tube.[42]

#### III.4.1 Paramètres des essais

Afin de pouvoir régler les angles de projection de l'abrasif et de centrer les impacts, nous avons réalisé un montage, Figures III.12, qui permet à la fois d'accorder à l'échantillon trois degrés de liberté (deux rotations et une translation), et au pistolet deux degrés de liberté (deux translations).

La distance entre l'échantillon et le pistolet peut être réglée selon la distance voulue en glissant la plaque dans la rainure droite du support.

Le réglage de l'angle peut se faire en faisant tourner le support autour de la tige traversant la plaque et autour de la tige verticale traversant la pièce, (suivant l'axe Z et Y), (la tige est filetée de façon à ce que l'échantillon soit bloqué et résiste à l'effort de l'abrasif).

Le pistolet est orienté pour que l'impact d'abrasif soit centré sur l'échantillon (l'entaille) en le déplaçant suivant les axes (Y) et (Z).

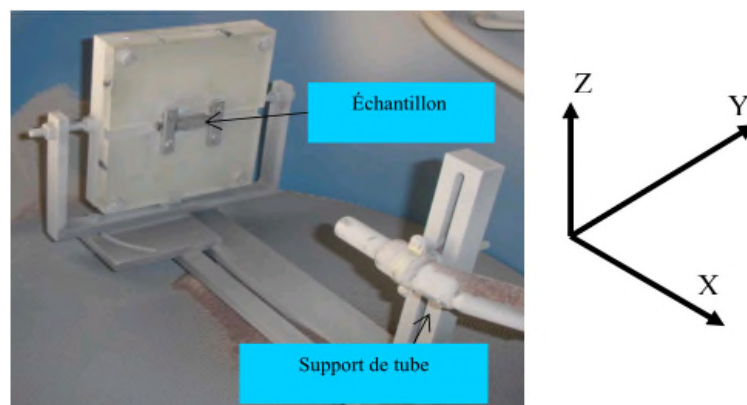


Figure III.12 : Montage porte éprouvette

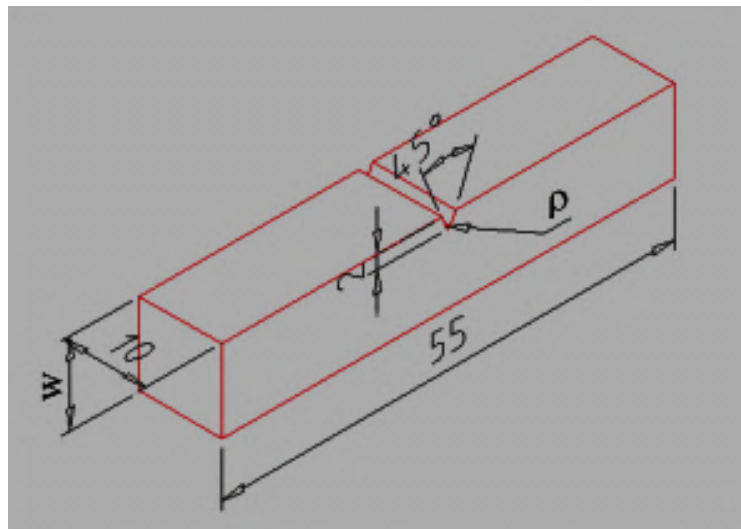
### III.4.2 Condition d'essai

- Le diamètre de la buse est fixe à 8mm,
- Le débit moyen durant les tests est fixé à environ 1.57 g/s,
- L'angle d'impact entre le débit de sable et la surface d'éprouvette est égal à  $90^\circ$ ,
- La distance entre le tube et l'éprouvette est fixée à 200 mm,
- La pression de flux de l'air est fixée à 4 bars (0.4 MPa),
- La vitesse du flux d'air, à 200 mm et à 4 bars, est 32 m/s,
- La durée de sablage varie entre 60 et 480 min.

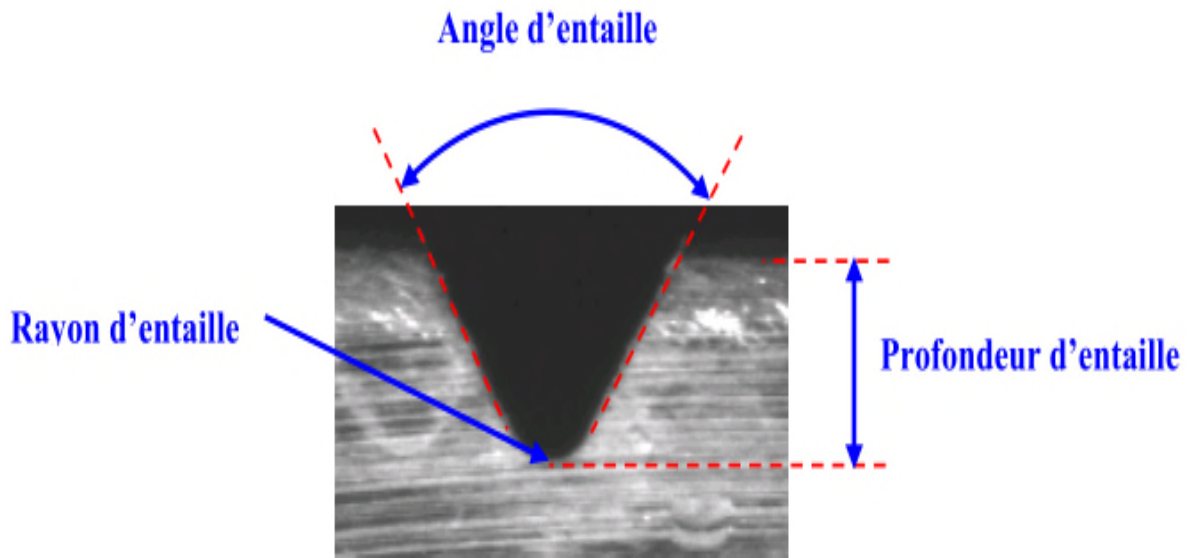
### III.4.3 Perte de masse et calcul du volume érodé

#### *Manipulation et résultats*

L'étude de perte de masse durant le temps du sablage a été réalisée sur des éprouvettes prélevées dans les deux sens L et T, Figure III.13. Etant donné les dimensions du tuyau (forte courbure et faible épaisseur), seule l'épaisseur diffère ( $w=10$  mm dans le sens L et 7.5 mm dans l'autre sens T). Le rayon d'entaille ( $\rho$ ) de ces éprouvettes varie entre 0.25, 0,50, 0,75 et 1 mm (figure III.14).



**Figure III.13:** géométrie de l'éprouvette



**Figure III.14** : Angle et Rayon d'entaille

La perte de masse a été évaluée en pesant les éprouvettes avant et après sablage. La précision de la balance utilisée est de  $\pm 0.005$  gr.

La quantité de matériau enlevé et le volume érodé sous sablage sont présentés dans les tableaux III.8 et III.9. Le volume érodé a été calculé, à masse volumique constante de  $7800 \text{ kg/m}^3$ .

A partir de ces données, nous traçons les courbes de variation d'écaillage du matériau pendant le sablage. Ces évolutions, dans les deux sens L et T, pour différents rayons d'entaille et de temps de sablage, sont présentées par les figures III.15, III.16, III.17, III.18, III.19, III.20, III.21, III.22.



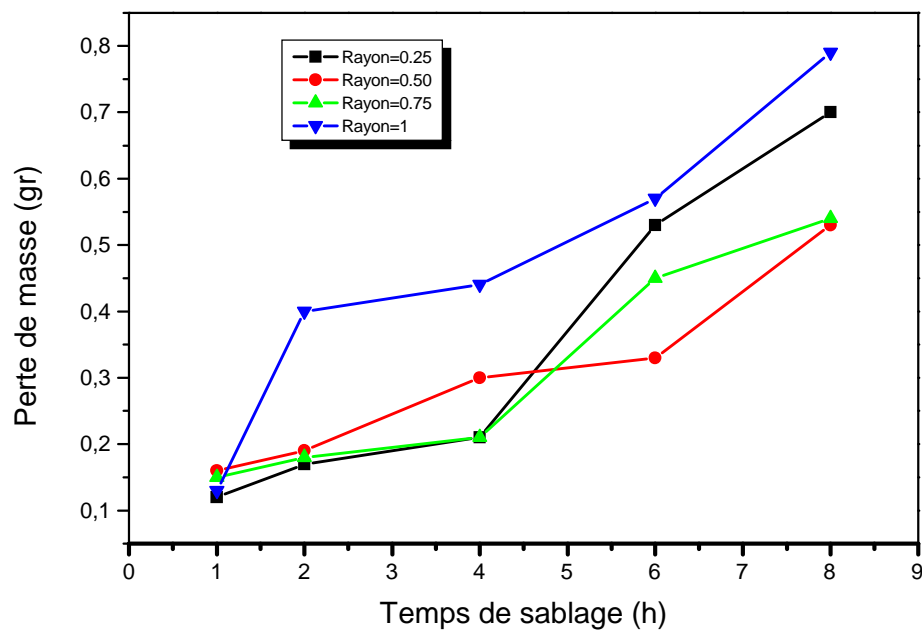
**Tableau III.8** : Valeurs de perte de masse et de volume érodé, dans le sens **L**, pendant le sablage.

N° de groupe	Rayon initial d'entaille (mm)	Temps de sablage (h)	Poids avant sablage (gr)	Poids après sablage (gr)	Perte de masse (gr)	Volume érodé (mm <sup>3</sup> )
1	0.25	0	42.24	-	0	0
		1	42.18	42.06	0.12	15.385
		2	42.35	42.18	0.17	21.795
		4	42.39	42.18	0.21	26.923
		6	42.41	41.88	0.53	67.949
		8	42.32	41.62	0.70	89.744
2	0.50	0	42.05	-	0	0
		1	42.29	42.13	0.16	20.513
		2	42.29	42.10	0.19	24.359
		4	42.20	41.90	0.30	38.462
		6	42.16	41.83	0.33	42.308
		8	42.32	41.79	0.53	67.949
3	0.75	0	42.27	-	0	0
		1	42.26	42.11	0.15	19.231
		2	42.22	42.04	0.18	23.077
		4	42.27	42.06	0.21	26.923
		6	42.24	41.79	0.45	57.692
		8	42.21	41.67	0.54	69.231
4	1	0	42.15	-	0	0
		1	42.18	42.05	0.13	16.667
		2	42.39	41.99	0.40	51.282
		4	42.31	41.87	0.44	56.41
		6	42.06	41.49	0.57	73.077
		8	42.04	41.25	0.79	101.28

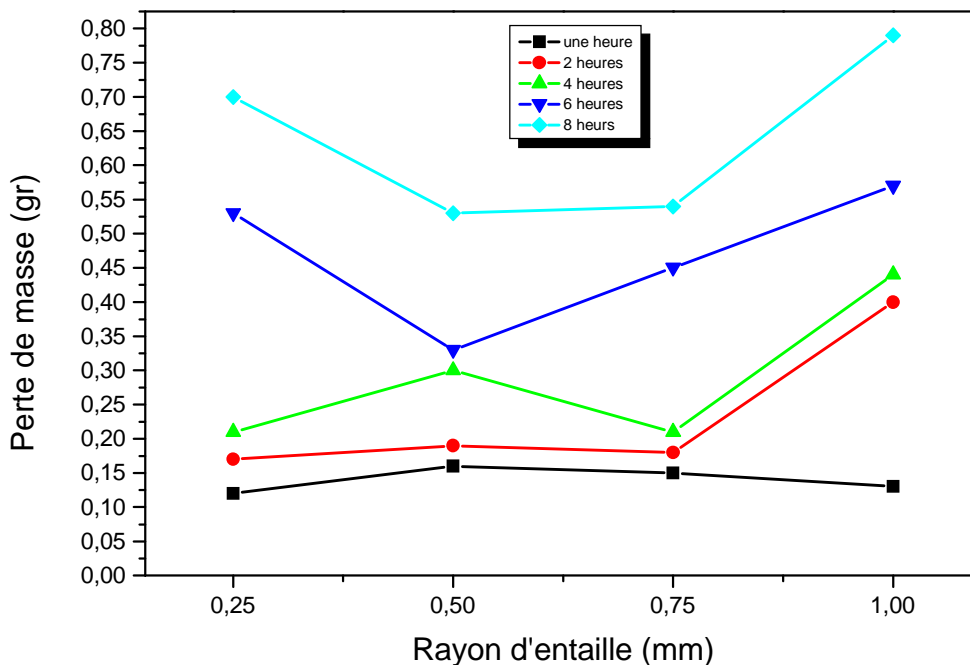
**Tableau III.9** : Valeurs de perte de masse et de volume érodé, dans le sens **T**, pendant le sablage.

N° de groupe	Rayon initial d'entaille (mm)	Temps de sablage (h)	Poids avant sablage (gr)	Poids après sablage (gr)	Perte de masse (gr)	Volume érodé (mm <sup>3</sup> )
1	0.25	0	31.67	-	0	0
		1	31.70	31.49	0.21	26.92
		2	31.57	31.33	0.24	30.77
		4	31.54	31.21	0.33	42.31
		6	31.68	31.25	0.43	55.128
		8	31.59	30.97	0.62	79.49
2	0.50	0	31.59	-	0	0
		1	31.52	31.27	0.25	32.051
		2	31.60	31.31	0.29	37.179
		4	31.52	31.22	0.30	38.462
		6	31.58	31.17	0.40	51.282
		8	31.50	31.07	0.43	55.128
3	0.75	0	31.59	-	0	0
		1	31.51	31.17	0.34	43.59
		2	31.54	31.18	0.36	46.154
		4	31.36	30.87	0.49	62.821
		6	31.39	30.56	0.83	106.41
		8	31.55	30.22	1.33	170.51
4	1	0	31.49	-	0	0
		1	31.44	31.235	0.205	26.28
		2	31.39	31.175	0.22	28.205
		4	31.52	31.13	0.39	50
		6	31.39	30.49	0.90	115.38
		8	31.32	29.95	1.37	175.64

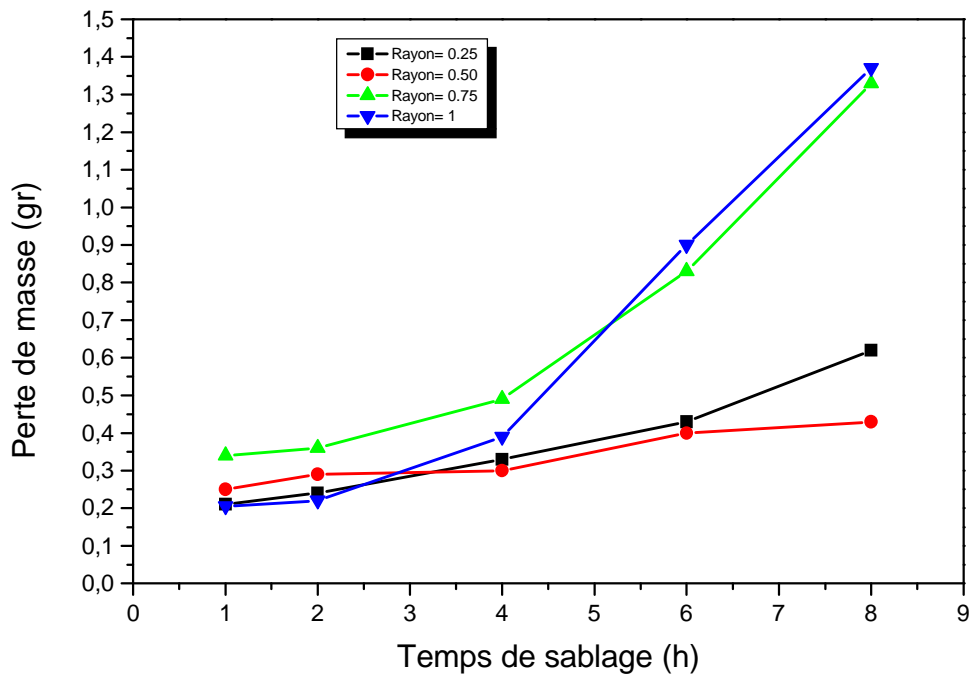




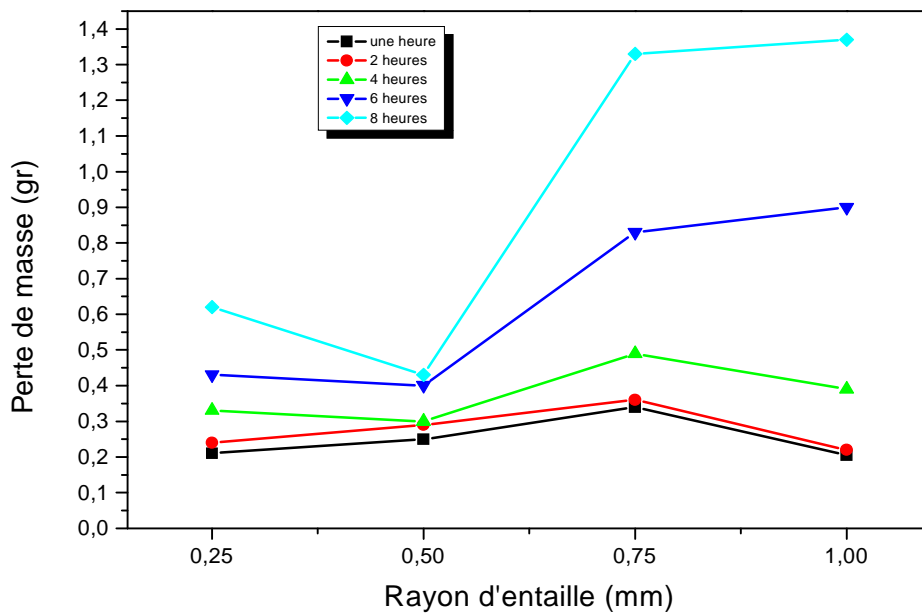
**Figure III.15:** Evaluation de la perte de masse dans le sens longitudinal (L) en fonction de Temps de sablage



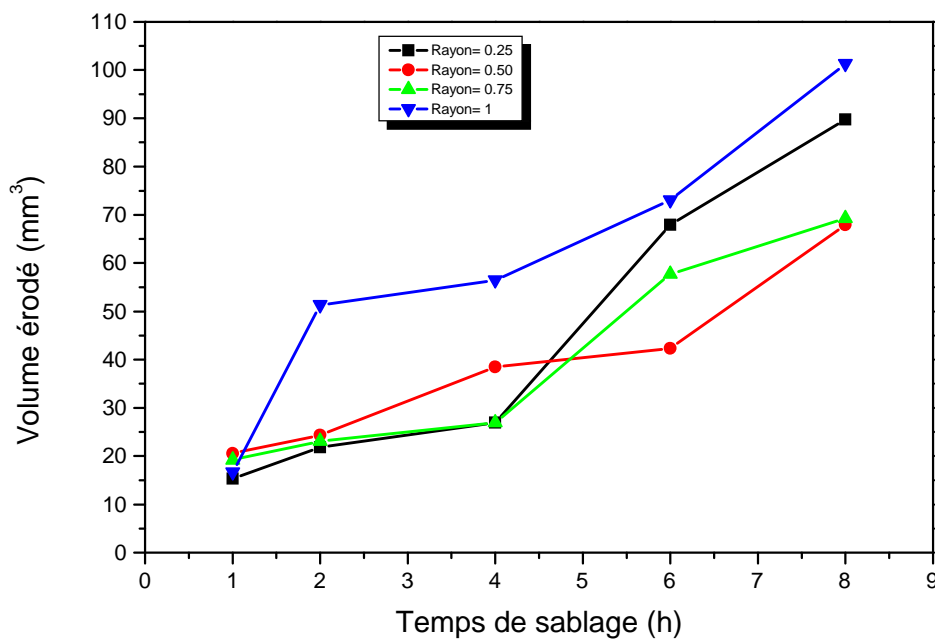
**Figure III.16:** Evaluation de la perte de masse dans le sens longitudinal (L) en fonction de Rayons d'entaille



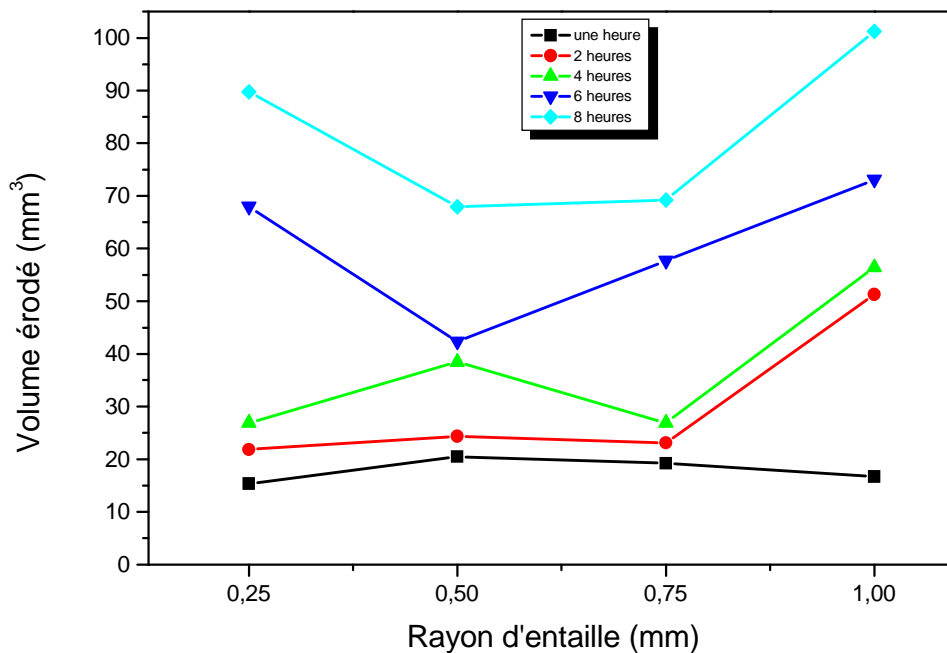
**Figure III.17 :** Evaluation de la perte de masse dans le sens transversal (T) en fonction de Temps de sablage



**Figure III.18:** Evaluation de la perte de masse dans le sens transversal (T) en fonction de Rayons d'entaille



**Figure III.19 :** Evaluation du volume érodé dans le sens longitudinal (L) en fonction de Temps de sablage



**Figure III.20 :** Evaluation du volume érodé dans le sens longitudinal (L) en fonction de Rayons d'entaille

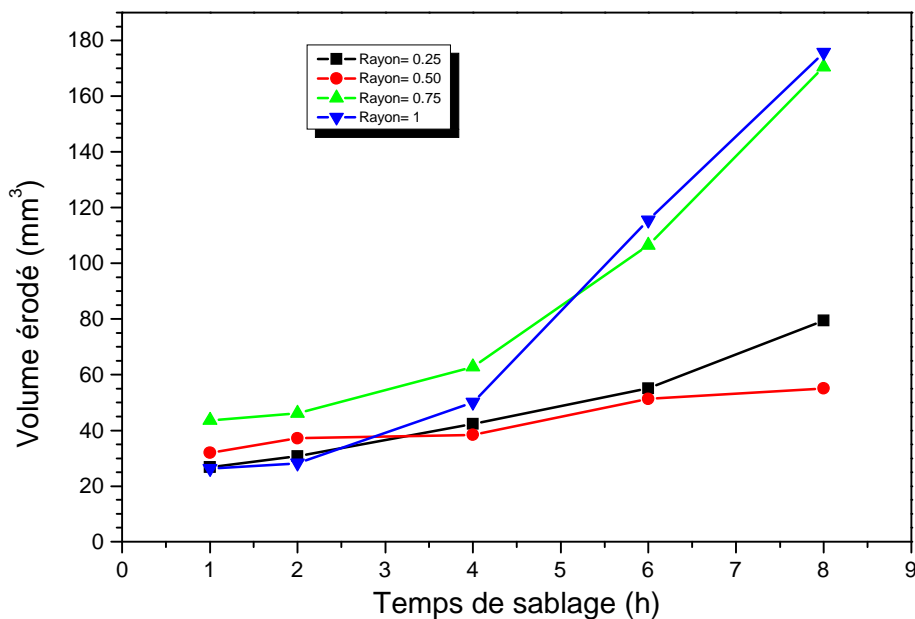


Figure III.21: Evaluation du volume érodé dans le sens transversal (T) en fonction de Temps de sablage

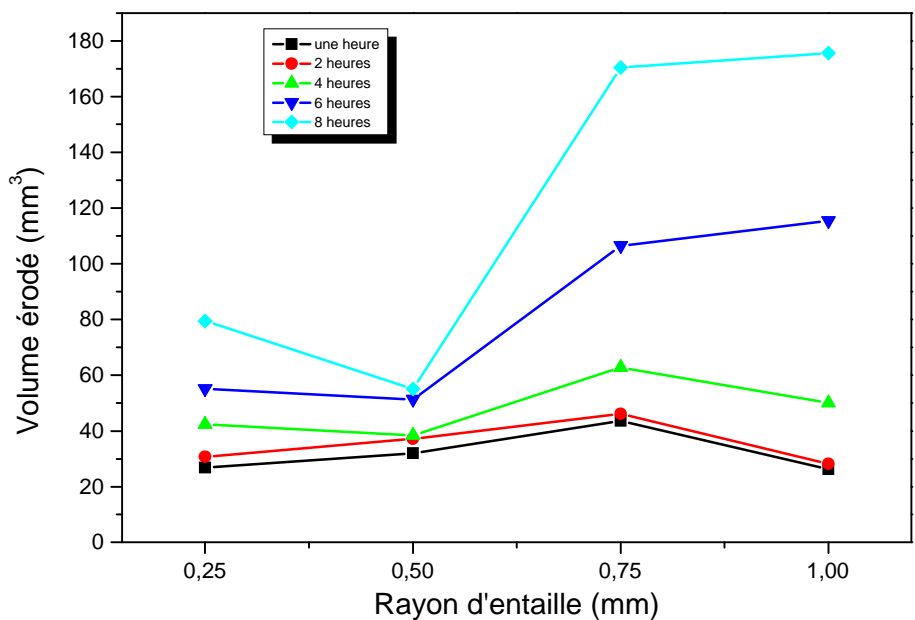


Figure III.22 : Evaluation du volume érodé dans le sens transversal (T) en fonction de Rayons d'entaille

Copie interdite

L'équation décrivant l'évolution de la perte de masse et du volume érodé en fonction du temps de sablage [43], s'écrit :

$$y = y_0 + a_c \cdot e^{(t/bc)} \quad (\text{III.1})$$

Les valeurs des constantes sont présentées sur les tableaux III.10, III.11:

**Tableau III.10** : Valeurs des constantes de formule mathématique de variation du volume érodé en fonction de temps de sablage.

Rayon d'entaille (mm)	Eprouvette (L)			Eprouvette (T)		
	$y_0$	$a_c$	$b_c$	$y_0$	$a_c$	$b_c$
0.25	-20.1839	28.57773	5.84844	11.02655	13.19768	4.87219
0.50	8.88968	10.4156	4.66157	-37.14225	66.79043	24.09414
0.75	-15.87.39	29.08347	7.28398	24.83984	11.95949	3.19359
1	0	27.55868	6.096336	0	18.87013	3.5498

**Tableau III.11**: Valeurs des constantes de formule mathématique de variation de perte de masse en fonction de temps de sablage.

Rayon d'entaille (mm)	Eprouvette (L)			Eprouvette (T)		
	$y_0$	$a_c$	$b_c$	$y_0$	$a_c$	$b_c$
0.25	-0.1.5745	0.22292	5.84857	0.08606	0.1029	4.87147
0.50	0.06935	0.08124	4.66143	-0.28936	0.52062	24.08097
0.75	-0.12381	0.22687	7.28441	0.19376	0.09328	3.19348
1	0	0.21495	6.09622	0	0.14637	3.54048

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériau, l'acier API 5L X60, et la procédure de traitement par sablage de l'acier corrodé. Les opérations de sablage sont effectuées sur une machine de sablage du type blaster 2700. Le choix de l'abrasif a été porté sur le corindon brun ou l'alumine ( $Al_2O_3$ ) dont les caractéristiques sont plus proches de celle du sable.

Les paramètres de sablage sont : la vitesse de sablage, le temps de sablage, l'angle de projection, et le rayon d'entaille d'éprouvette. La réalisation de l'essai de sablage, permet d'évaluer la perte de masse et le volume érodé dans les deux sens L et T respectivement longitudinal et transversal en fonction de temps de sablage et du rayon d'entaille.

Les résultats ont montrés que la déformation par sablage dans le sens T est plus importante que celui dans le sens L, ce qui nous permet de conclure que la résistance du matériau, à une charge dynamique (impact de sable), est plus faible dans ce sens (T). Pendant le sablage, l'angle d'entaille diminue contrairement à la croissance du rayon et de la profondeur d'entaille.

Nous constatons la tendance supérieure du volume érodé en fonction du rayon d'entaille. Ceci peut être justifié par la quantité de sable impactée, plus importante pour un grand rayon d'entaille.

Les résultats ont montrés que le traitement mécanique par sablage dépend de plusieurs paramètres : vitesse de projection, granulométrie, l'angle de projection, forme des grains. Une étude de simulation du sablage a montré également que l'orientation de pipe influe sur le sablage pendant l'opération de sablage. Après sablage les surfaces obtenues sont bien traitées pour l'application d'un nouveau revêtement contre les anomalies de surface.

Nous présenterons dans le chapitre suivant les résultats et les discussions sur le traitement mécanique par sablage.

Copie interdite

***CHAPITRE IV***  
***RESULTATS ET DISCUSSIONS***

## Introduction

La ligne GZ1 est constituée par les tubes en acier API 5L X60 qui depuis son exploitation il y a une trentaine d'années présentent des défaillances dont les réductions d'épaisseur du à l'amorçage et la propagation des piqures de corrosion (pitting corrosion). Ces effets se traduisent par une modification de l'état de surface et une perte de métal de la surface en contact avec le milieu corrosif qui est mesurée lors des inspections par sondage ultrasonique et par inspection visuelle pouvant aller jusqu'à la perforation du tube. Les tubes corrodés doivent faire l'objet de réparation dans la station STT (Station de traitement de tubes) exploitée par la Sonatrach Bethioua. Les opérations de traitements des tubes corrodés après extraction de la ligne et stockage comprennent : Inspection des tubes, Stockage, Décapage et sablage, Application du nouveau revêtement.

Nous sommes intéressés dans ce travail au traitement mécanique superficiel par sablage des tubes corrodés effectués sur machine de sablage en utilisant l'abrasif corindon  $Al_2O_3$ .

Une simulation du sablage a été faite en utilisant des échantillons en acier prélevé de différentes orientations de pipe longitudinal (L) et transversal (T). L'alimentation du sable se fait par effet venturi, permettant d'avoir un débit de sablage constant durant toute l'opération de sablage.

Les résultats seront discutés selon les variations de paramètres de sablage : granulométrie (0.18 à 2.3 mm), rayon d'entaille (0.25 à 1 mm) et la durée de sablage (1 à 8 heures).

### IV.1 Perte de masse et volume érodé par sablage

Le traitement mécanique par sablage est caractérisé par une perte de masse. La quantité de matériau enlevé et le volume érodé sous sablage sont présentés dans les tableaux III.8 et III.9.

Au vu des résultats obtenus, nous confirmons la tendance croissante d'érosion durant le sablage. Pendant le sablage, l'angle d'entaille diminue contrairement à la croissance du rayon et de la profondeur d'entaille.

L'érosion moyenne, comprenant la perte de masse et le volume érodé, est plus importante dans le sens transversal T que dans le sens longitudinal L.

En observant sur les graphes précédentes (chapitre 3), nous constatons qu'après huit heures de sablage et pour des éprouvettes avec rayon d'entaille 1mm, la perte de masse est respectivement de 0.79 gr et de 1.37 gr dans les sens L et T. Concernant le volume érodé pendant le sablage dans les deux sens L et T, nous remarquons qu'il est de  $101.28 \text{ mm}^3$  et de  $175.64 \text{ mm}^3$ . Donc la déformation du matériau dans le sens T est



de 73% plus élevé que dans le sens L. L'acier API 5L X60 plus résisté à une charge dynamique donnée, est plus faible dans le sens T que dans le sens L.

L'influence du rayon d'entaille sur l'écaillage du matériau se traduit par :

- Dans le sens L, la perte de masse et le volume érodé sont plus importants pour un rayon d'entaille supérieur à 0.75mm. Pour un rayon inférieur, son influence est moindre.
- Dans le sens T, la déformation par sablage, pour un rayon d'entaille inférieur à 0.5 mm, est presque constant. A partir de cette valeur, plus le rayon est grand plus l'érosion est importante.
- En général, plus le rayon d'entaille est grand, plus la quantité de sable impactée est importante.

#### IV.2 Vitesse de sablage

L'importance du refoulement est d'autant plus grande que la force vive du projectile est élevée et c'est là qu'intervient l'importance de la pression débitée par l'installation d'air comprimé.

Le tableau III.6 résume bien l'influence des deux derniers facteurs. Il donne une idée valable de l'importance de la rugosité en fonction de la variation du calibre de l'abrasif et de sa vitesse (figure III.3).

Mesure de la vitesse des particules du corindon, La Variation de la vitesse du flux d'air en fonction de la distance, nous remarquons que plus la distance augmente plus la vitesse diminuée et l'inverse, donc la distance prise à partir de la buse et la surface a traité joue un rôle très important (Figure III.4)

#### IV.3 Effet de granulométrie

Distribution de la taille des grains, dans notre cas, le rapport de forme de grains se situe entre la valeur 1,5 et 1,7. Ceci signifie qu'une bonne partie des grains ont une forme anguleuse (figure III.9). La forme des particules en général, dans les mêmes conditions d'essai et pour une même taille, les particules anguleuses causent une dégradation plus importante que celles des particules arrondies, La figure III.10 illustre la distribution de la taille des grains du corindon brun. Nous remarquons que la taille moyenne est comprise entre 300 et 400  $\mu\text{m}$ .

### Conclusion

Le traitement mécanique superficiel par sablage des tubes corrodés effectués sur machine de sablage en utilisant l'abrasif corindon  $Al_2O_3$  est des opérations de maintenance qui dépendent de plusieurs paramètres : vitesse de sablage, angle de projection, granulométrie, diamètre de la buse, nature de l'abrasif.

Une simulation du sablage a été faite en utilisant des échantillons en acier prélevé de différentes orientations de pipe longitudinal (L) et transversal (T). L'alimentation du sable se fait par effet venturi, permettant d'avoir un débit de sablage constant durant toute l'opération de sablage.

La qualité de l'opération de sablage dépend de plusieurs facteurs : les performances de la machine, les manipulations de l'opérateur, les appareilles de mesure et la qualité de l'abrasif utilisé.

Copie interdite

## ***CONCLUSION GENERALE***

**Conclusion Générale**

Un gazoduc destiné au transport du gaz naturel est une structure dont l'intégrité doit être garantie. En particulier, pour éviter tout amorçage de rupture, le dimensionnement de la structure avec un coefficient de sécurité adéquat. De plus, la température de transition ductile fragile de l'acier est choisie de façon à empêcher une rupture fragile du tube.

Les aciers de pipelines sont du type ferrito-perlitique, micro allié de type API 5L X60 (*American Petroleum Institute*). Ils ont connus un développement dans le processus métallurgiques de laminage et refroidissement contrôlé leur donnant de bonnes propriétés de résistance et de haute élasticité aciers HLE par affinage du grain ferritique. L'étude a porté sur un tronçon de 20 Km de la ligne GZ1 40" qui relie le gisement de gaz naturel HassiR'Mellà Arzew sur une distance totale de 507 Kms, où des opérations de sablage ont été effectuées.

Les procédés de réparation en maintenance, nous avons présenté les procédés de traitements de surface par transformation structurale par voie mécanique (sablage, grenailage...), thermique (chauffage superficielle, Trempe superficielle, soudage...) et chimique (par diffusion, par revêtement...) des aciers, et les principales opérations de préparation de surface avant le traitement et revêtement de surface. Après nous avons vu des techniques de revêtement des tubes qu'est : polyuréthane (PU) après le traitement de surface, et les caractéristique de la résine PU. En fin de ce chapitre en présente les procédés de fabrication des tubes des pipelines : Les tubes soudés sous la forme en spirale, Les tubes soudés sous forme longitudinale et les tubes formés sans soudure.

Les aciers pour gazoducs se développent de jour en jour, et la modernisation de fabrication des aciers augmentent les propriétés telles que la résistance. Les principales caractéristiques des aciers pour les tubes HSLA sont leur très haute résistance à la rupture et leur excellente ténacité à très basse température pour les aciers de forte épaisseur. De plus ces qualités présentent une bonne aptitude au soudage obtenu grâce à une composition chimique adaptée. La régularité des caractéristiques mécaniques des aciers API destinés à la fabrication de gros tubes soudés facilite les opérations de formage et de soudage. Les aciers sont passés du grade X52 au grade X70 employés de nos jours avec des microstructures ferrito-perlitique. Le passage à des grades supérieurs X80, X100 passe par le développement d'aciers de structures ferrito-bainitiques. La ligne GZ1 pour le transport du gaz naturel a été exploitée depuis une quarantaine d'années. Elle est exposée aux phénomènes de la dégradation par corrosion.

La détection des défaillances se fait par un outil de détection des défauts par ultrasons (outil intelligent). Les tubes corrodés sont traités par différentes méthodes de réparation : collage par patch, clockspring, demi-coquille,...

L'étude de simulation du sablage à débit constant durant toute l'opération de sablage sur des échantillons prélevés de pipe dans le sens longitudinal (L) et transversal (T) a été effectuée sur une machine de sablage avec comme abrasif le corindon brun dont les caractéristiques sont plus proches de celle du sable. Cette étude a montré également que l'orientation de pipe influe sur le sablage pendant l'opération. Après sablage les surfaces obtenues seront destinées pour l'application d'un nouveau revêtement.

Les résultats ont montré que le traitement mécanique par sablage dépend de plusieurs paramètres : vitesse de projection, granulométrie, l'angle de projection, forme des grains.

Le traitement mécanique par sablage pourra être comparé dans un futur mémoire par une autre méthode de traitement de surface comme le grenaille.

Copie interdite

# ***Bibliographie***

## Bibliographie

- [1] Jean-Pierre Jansen. Aciers, tubes et pièces de forme cours rédigé par monsieur Jansen 3.2 1<sup>er</sup> partie intervenant responsable recherche développement produit société EUROPIPE.
- [2] Patricia Laurens, Catherine Dubouchet, Didier Kechemair, Matériau et traitement de surface, Technique de l'ingénieur. Doc : M 1 643.
- [3] Alain Queruel, Traitement de surface des aciers. Aide-mémoire de l'ingénieur, Dunod, Paris 2007, ISBN 978-2-10-049975-5.
- [4] Mr. A Benmoussat, cour science des matériaux (SDM), 1<sup>er</sup> année master 2012 (université aboubekrbelkaid faculté de technologie Tlemcen-Algerie).
- [5] Jian LU, SNDL, Traitements de surface mécaniques, Technique de l'ingénieur, Doc : M 1 190, Date de publication : 10/12/2006.
- [6] C. Barret, Interactions traitement thermiques traitements de surface sur les aciers, SETIM (centre technique des industries mécaniques) 1997, ISBN 2-85400-397-7.
- [7] Martine Wéry, Décapage mécanique des surfaces métalliques, SNDL, technique de l'ingénieur, M1457.
- [8] I. Lakhtine, métallographie et traitement thermiques des métaux, Quatrième Edition MIR. MOSCOU 1986, pp 222-254.
- [9] George A. Antaki. Piping and Pipeline Engineering Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair. Aiken, South Carolina, U.S.A 2003.
- [10] Roland Cazes. Procédés de soudage, SNDL, technique de l'ingénieur, Doc : B 7 700.
- [11] J.M Gray and Poutremoli M, (1987). Metallurgical options for API grade X70 and X80 line pipe. In international conference: pipe technology.
- [12] A. Benmoussat, Etude sur la corrosion des aciers HLE pour canalisations de gaz à haute pression, thèse de doctorat, université Mohamed Boudiaf (USTO-MB), ORAN 2006.
- [13] Pierre D'ans. Contribution à la mise au point d'une démarche rationnelle de sélection des traitements de surface, Illustrée dans le cas des dispositifs de fonderie de l'aluminium, université libre de Bruxelles, 2008-2009.
- [14] Jacques Deruelle, Préparation des surfaces, SNDL, Technique de l'ingénieur, Doc : M 1 435.
- [15] Jian LU, Traitements de surface mécaniques, SNDL, Technique de l'ingénieur, Doc : M 1 191.
- [16] F. Aggoune. Évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation, Université Mentouri Constantine, Magister en Génie Mécanique 2010.
- [17] A. Bouziane, Contribution à la détermination des critères des qualités des tubes soudés soumis à une pression intérieure. Thèse de Magistère en génie mécanique, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 2007/2008.





- [33] Hannachi Mohamed Tahar, Etude du Comportement Mécanique des Joints Soudés lors du Soudage des Tubes par Induction à Haute Fréquence (HF), thèse de doctorat option mécanique, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2010-2011.
- [34] BoutchicheAthmane, étude du comportement de l'acier X60 pour gazoduc dans un milieu agressif, mémoire de l'ingénieur en construction mécanique, Université Abou Beker Belkaid Tlemcen 2000-2001.
- [35] Bastien Chapuis. Contrôle Santé Intégré par méthode ultrasonore des réparations composites collées sur des structures métalliques, Université Paris, Diderot (Paris 7). Soutenue le 22 septembre 2010.
- [36] Detnorske VERITAS. DNV research and innovation, method for qualification of composition repairs for pipelines: Patch repairs and considerations for cathodic protection, Technical report N°2009-9332.
- [37] Michael Stuart, Static Strength Testing Of Bonded Composite Patch Repair, School Of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of New South Wales (2004), pp: 9,17.
- [38] Scott Rukke, Pipeline Repair Using Clock Spring, Composite Sleeve Reinforcement, Washington Utilities, Transportation Commission.
- [39] Clock spring, installation guide and checklist; clock Spring Company, L.P. 14107 Inter drive west Houston, Texas 77032.
- [40] A. Benlekhal, Rapport sur les procédures de réparation en charge de canalisation de transport d'hydrocarbures par demi-coquilles soudées, SONATRACH-DRC, Oran-Arzew, 15 Août 2010.
- [41] A. HAFIFI (ingénieur d'inspection), Rapport sur les traitements de surface par la projection d'abrasif (sablage) des canalisations du gazoduc, SONATRACH-DRC, Oran-Arzew, 2000.
- [42] A. Alhusseina, J. Capellea, J. Gilgerta, S. Dominiakb, Z. Azari. Influence of sandblasting and hydrogen on tensile and fatigue properties of pipeline API 5L steel, Sciencedirecte, Université Paul Verlaine de Metz, France, 2010.
- [43] A. Alhussein, Transport et stockage des dérivés pétroliers Problématique d'endommagement des pipes par érosion de sable et par hydrogène, thèse de doctorat (Sciences des Matériaux) Université Paul Verlaine de Metz, France, 2010.
- [44] I. Campbell, Eurogrit Aluminium Silicate (coalslag) blast cleaning abrasive, Analytical report No MAL 13637. Sonatrach-DRC Arzew, Oran.
- [45] F.C. Tsai, B.H. Yan. A Taguchi and experimental investigation into the optimal processing conditions for the abrasive, SNDL, Sciencedirecte, University Chung-Li, Taiwan 2008.

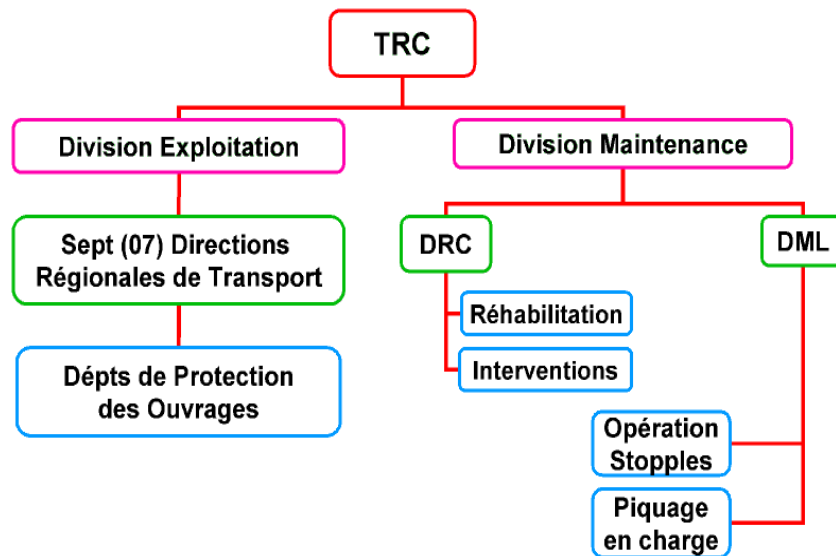
Copie interdite

***Annexe***

## Annexe 1 : Présentation de DRC

La direction de la réparation des canalisations DRC est une filiale de la direction TRC-Sonatrach – Bethioua ayant pour mission la maintenance des tubes dans le transport par canalisation par réhabilitation et les inspections lors des interventions selon l'organigramme suivant :

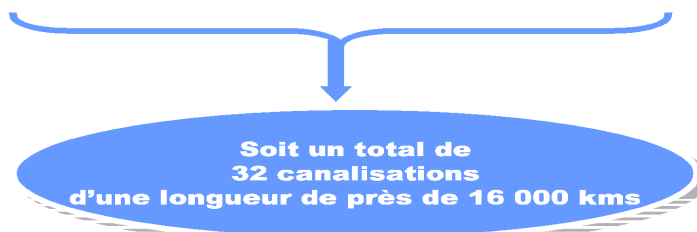
### Organisation de la maintenance des canalisations à TRC



La structure d'exploitation de TRC :

### Reseau de canalisations de TRC

- 14 canalisations de Gaz Naturel
- 11 canalisations de Pétrole Brut
- 03 canalisations de Condensat
- 04 canalisations de GPL



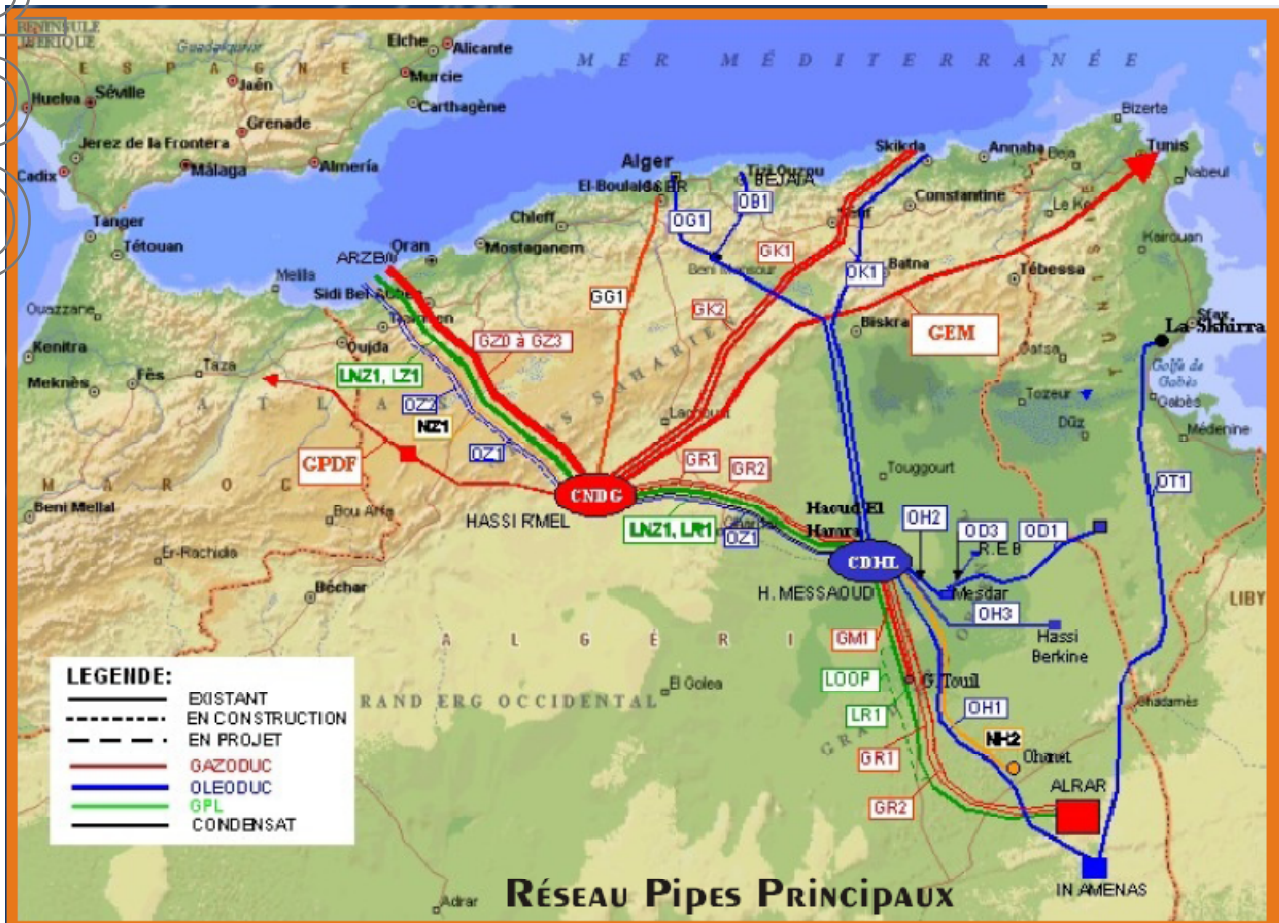
**Annexe2:** Carte géographique de réseau de transport des hydrocarbures par canalisation en Algérie.

Sonatrach dispose également de nombreux postes de chargement à quai de gaz et de pétrole au niveau de trois ports pétroliers de chargement d'hydrocarbures sur les villes côtières que sont Arzew, Bejaia et Skikda

Les 03 ports sont équipés de 5 bouées de chargement de pétrole en haute mer.

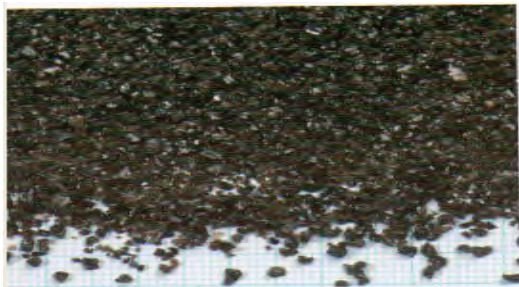
Quant au réseau de canalisation (Gazoducs/Oléoducs), sa longueur est de près de 18 512 Km, et compte :

- 20 oléoducs d'une longueur de 9 883 Km, avec une capacité de transport de 145 Millions Tonnes.
- 14 gazoducs d'une longueur totale de 8629 Km, avec une capacité de transport de 142 milliards de m<sup>3</sup>/an.

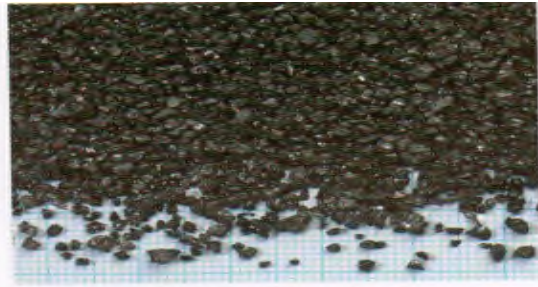




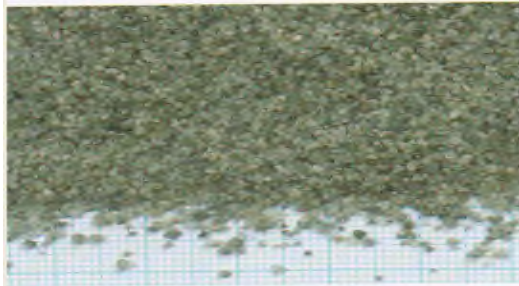
Annexe 3 : différents types d'abrasif



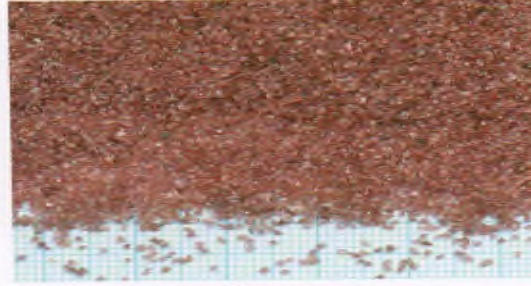
Scorie de fusion  
Silicate d'Aluminium Eurogrit



Scorie de cuivre  
Silicate de Fer Euroram



Olivine



Grenat



Abracor ®



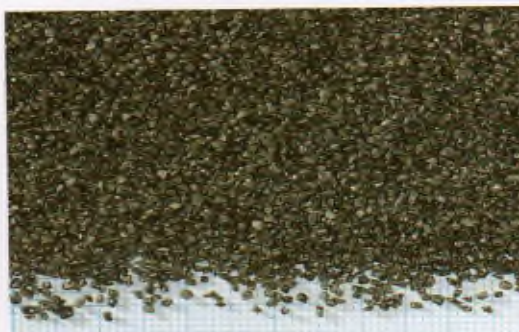
Oxyde d'Aluminium (Corindon)



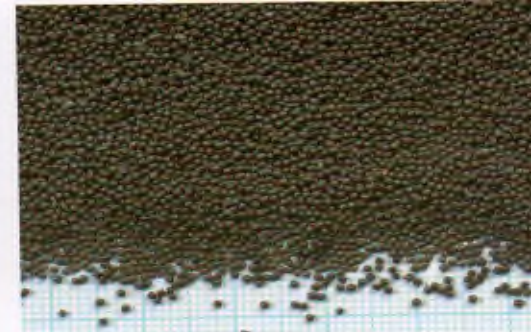
Carbonate de Calcium Eurocal



Microbilles de verre



Grenaille d'acier angulaire



Grenaille d'acier ronde

#### Annexe 4 : Réhabilitation des tubes

Durant les vingt dernières années, TRC a réhabilité plus de 1800 km de canalisations de différents diamètres, soit (12%) du réseau. Le tableau suivant définit le Bilan de réhabilitation.

**Tableau : Bilan de réhabilitation**

Ouvrages	Agés	Longueurs réhabilitées	%
OB1 Ø 24''	47	25 km	4
OZ1 Ø 28''	41	226 km	36
OG1 Ø 16''	35	132 km	100
OK1 Ø 40''	34	644 km	84
LNZ1 Ø 16''	32	486 km	100
NZ1 Ø 28''	28	100 km	20
OH1 Ø 30''	23	90 km	11
GK1 Ø 40''	28	108 km	84
GZ1 Ø 40''	30	245 km	48

## Annexe 5 : installation de clockspring

### ✓ **Kit de renforcement :**

Contient l'ensemble des produits consommables nécessaire à la pose d'un manchon de renforcement. Les moyens et outillage nécessaires à la réalisation des opérations préalables ne sont pas inclus dans le kit.

✓ **Matériau composite :** Structure composée de deux ou plusieurs matériaux non miscibles. Dans notre cas résine époxydique en polyester armé de fibre de verre.

✓ **Manchon spirale :** Le manchon spirale est un rouleau en matériau composite constitué de huit (08) spires en général et adapté au diamètre de la canalisation.

✓ **Temps de séchage :** Le temps de séchage limite la durée d'application des produits et constitue donc une contrainte à surmonter adaptant la vitesse du travail.

### ✓ **Starter pad :**

□ Bande en polyéthylène autocollante (bande de démarrage) utilisée comme point de fixation du manchon spiralé de renforcement.

### ✓ **Présentation du manchon spiralé :**

- Déroulement du rouleau et enroulement autour de la pipe
- Positionnement et traçage de la portée du rouleau
- Fixation du starter pad sur une partie saine de la pipe.

### ✓ **Préparation des produits**

- Vérification de la date de péremption des produits
- Dosage et malaxage des produits chimique suivant recommandations du fabricant.

### ✓ **Application du mastic :**

- Remplissage des cavités créées par la corrosion ainsi que les bords des joints de soudure et les bords du starter pad.

### ✓ **Application de l'adhésif :**

- Application d'une couche initiale sur la pipe et d'une couche intermédiaire entre tous les spires du manchon.

### ✓ **Conseils pratiques :**

- La pose du manchon doit avoir lieu tant que le mastic est encore mou,
- Serrer énergiquement les spires,
- L'adhésif doit déborder d'environ 5 cm de part et d'autre du manchon,
- Aligner les spires à l'aide des taquets fournis dans le kit,
- La température lors de la pose doit se situer entre 10 et 27 C° de préférence,
- La dureté des produit à la fin du séchage doit être de l'ordre de 40 shore A,
- Après enroulement de la dernière spire le maintien de la tension de serrage et assuré par application de plusieurs couches de ruban adhésif (scotch)

## Annexe 6: Installation de demi-coquille

Pour assurer la sécurité du personnel chargé de la réparation et améliorer le renforcement dû aux demi-coquilles, il est recommandé d'exploiter la ligne durant les opérations de réparation à une pression se situant entre 50% et 80% de la pression d'exploitation normale. Les travaux de préparation sont :

- a) Déconnecter la protection cathodique du tronçon de canalisation à réparer.
- b) Localiser et excaver le segment de canalisation à réparer.
- c) Décaper l'enrobage du segment en évitant que le tube dénudé ne vienne en contact direct avec le sol, et en nettoyer la surface à l'aide d'une brosse métallique.
- d) Documenter la nature, la position et les dimensions des défauts à réparer.
- e) Meuler à ras les cordons des soudures hélicoïdales/longitudinales et circonférentielles du segment de canalisation à réparer après s'être assuré de leur intégrité à travers une inspection aux ultrasons ou rayons X.
- f) Meuler tous les défauts apparents dans une bande de 150 mm de part et d'autre de l'emplacement des soudures d'angle en s'assurant de ne pas dépasser une profondeur de 12.5% de l'épaisseur des tubes.
- g) Inspecter cette bande aux ultrasons pour s'assurer de l'existence d'une épaisseur suffisante et de l'absence de l'animation.

***Revêtement :***

- Appliquer sur la surface extérieure des demi-coquilles soudées une couche de revêtement compatible avec le revêtement de la ligne.
- Contrôler au balai électrique le revêtement ainsi appliqué.

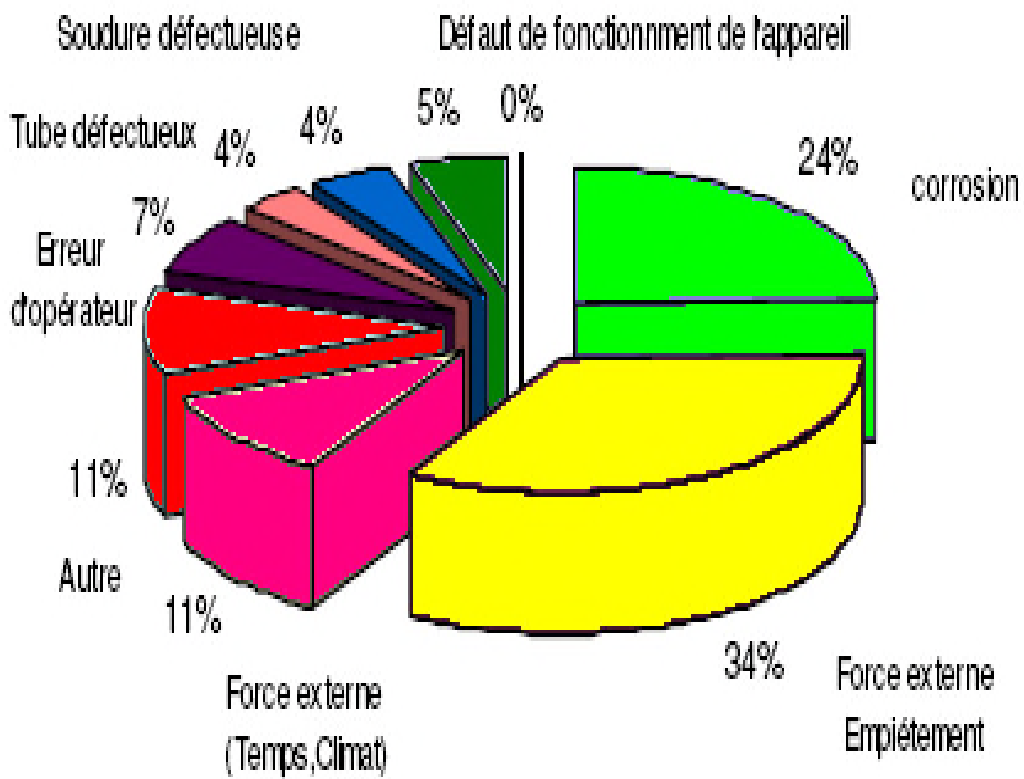
**Annexe 7: Mode de rupture de gazoducs en cours d'exploitation**

Les causes de défaillances des gazoducs sont de diverses natures. Elles peuvent se



manifester soit par rupture, soit par fuite. La plus part de cas des défaillances sont causés par le matériau par des mécanismes de corrosion localisée ou de fissurations tel que la corrosion sous contraintes, mais il existe également d'autres problèmes liés aux défauts de soudage ou de mouvement de terrain (glissement du sol ; tremblement de terre,..) qui peuvent être la cause de dommage des gazoducs enterrés.

Des agressions mécaniques extérieures peuvent être la cause où il arrive que les gazoducs soient endommagés ou perforés accidentellement lors de travaux d'excavation par des engins de chantier. Les Causes de rupture de gazoducs en cours d'exploitation sont présentées sur la figure suivant :



**Annexe 8 : Quelques des défaillances d'acier X60 (STT)**

interdite

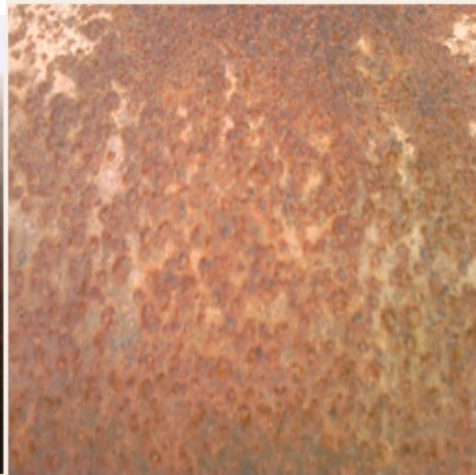


a- Pics de corrosion (localisée)



b- pique de corrosion

Copie

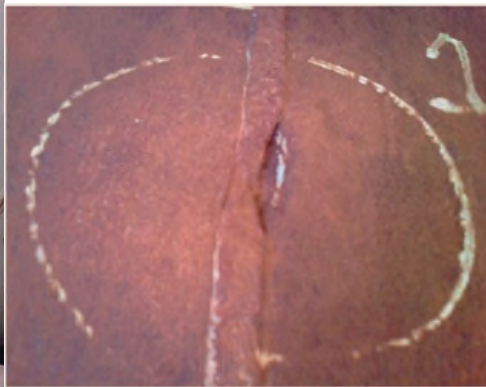


c- déformation

d- corrosion



rupture



f- corrosion en cordon de soudure

e-