



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد ابن باديس - مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES



N° d'ordre :

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES DE MASTER ACADÉMIQUE

Filière : Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

Thème

Corrosion des pipelines: Applications au tronçon Haoud ElHamra

Présenté par :

- Nour El Houda MOKTAR
- Abdelkader KESSAB

Soutenue le : .../ 08/ 2020 devant le jury composé de :

Président : M.R. GHEZZAR

Professeur Université de Mostaganem

Examineur : S.I. ABDELLI

MCB Université de Mostaganem

Rapporteur : A. DJELLOUL

Professeur Université de Mostaganem

REMERCIEMENTS

En premier lieu, on tient à remercier mon Dieu ALLAH qui à donner la force à achever ce projet.

Ce travail a été effectué au faculté de science et de la technologie, département de génie des procédés de l'Université de Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, sous la direction scientifique de Monsieur **DJELLOUL Abdelkader** Professeur à l'université de Mostaganem, je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques,

Grande merci pour mon encadreur monsieur **DJELLOUL Abdelkader** de sa constante disponibilité et d'avoir fait preuve de grande patience, il aide moi aussi pour choisie ma future direction.

Nous exprimons profondément et respectueuse gratitude à Mr **GHEZZAR Mouffok Redouane**, professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Qui nous a honorés d'accepter de présider le jury de cette mémoire.

Nous voulons transmettre nos profonds remerciements et notre profonde expression respect à M^{me} **ABDELLI ISLAM Safia** Maitres de conférences classe «B» à Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant d'examiner ce travail.

Nous adresse mes vifs remerciements :

A nos familles Mes parents, et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles. Les conseils qu'il nous a prodigué, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études.

Nous tenons à remercier toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.

A tout les équipe de génie chimique

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

A tout, pour tout, merci.

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à:

A mes très chers parents, Mokhetar MOKTAR et Karima LATRECH, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A ma très chère amie Afafe BENKABOUCHE pour l'encouragements permanents, et le soutien moral et physique,
A mes ami(e)s Billel SAIDJ, Yamina Gana, Nassima BENAICHA pour leur appui et leur encouragement et l'aide.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Nour El Houda

Abstract

Corrosion in pipelines for transporting hydrocarbon gas remains among the problems that have not found an absolute solution. Despite the difficulty of this phenomenon, there are several methods of detecting it at the outset and limiting its spread. Among these methods related to the detection of pipeline oxidation, there is an intelligent tool that provides all the dimensions related to the pipeline and oxidation (length, width, height), making it easier to know the location, size and type of oxidation. The analysis results obtained on the shaft Haoued Elhamra section showed that the corrosion was 81% external.

Key-words: Corrosion, Pipelines, Excel, Statistica.

Résumé

La corrosion dans les pipelines pour le transport du gaz des hydrocarbures reste parmi les problèmes qui n'ont pas trouvé de solution absolue. Malgré la difficulté de ce phénomène, il existe plusieurs méthodes de le détecter au départ et de limiter sa propagation. Parmi ces méthodes liées à la détection d'oxydation des canalisations, il existe un l'outil intelligent qui permet de donner toutes les dimensions liées au pipeline et à l'oxydation (longueur, largeur, hauteur), ce qui facilite la connaissance de l'emplacement, de la taille et du type d'oxydation. Après analyse préliminaire des données recueillis par l'outil et convertis sur Excel des calculs ont été réalisés en utilisant Excel et Statistica. Les calculs réalisés ont été effectués sur recommandation d'un expert Sonatrach de la maintenance et de la réparation des pipelines. Les résultats d'analyse obtenus sur le tronçon puits Haoued Elhamra ont montré que la corrosion était externe à 81%.

Mots-clés: Corrosion, Pipelines, Excel, Statistica.

ملخص

لا يزال التآكل في خطوط الأنابيب لنقل الغاز الهيدروكربوني من بين المشاكل التي لم تجد حلاً مطلقاً. على الرغم من صعوبة هذه الظاهرة إلا أن هناك عدة طرق لاكتشافها في البداية والحد من انتشارها. من بين هذه الطرق المتعلقة باكتشاف أكسدة خطوط الأنابيب ، هناك أداة ذكية تسمح بإعطاء جميع الأبعاد المتعلقة بخط الأنابيب والأكسدة (الطول والعرض والارتفاع) ، مما يسهل معرفة موقع وحجم ونوع الأكسدة. بعد التحليل الأولي للبيانات التي جمعتها الأداة وتحويلها باستعمال Excel ، تم إجراء الحسابات باستخدام Excel و Statistica. تم إجراء الحسابات بناء على توصية من أحد خبراء سوناطراك في صيانة خطوط الأنابيب وإصلاحها. أظهرت نتائج التحليل التي تم الحصول عليها على قسم الآبار أن التآكل الخارجي 81%.

الكلمات المفتاحية: التآكل ، خطوط الأنابيب ، Excel ، Statistica.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	
DÉDICACE.....	
Abstract	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX.....	
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I: Étude Bibliographique	
.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Transport par canalisation.....	4
I.2.1 Les pipelines destinés au transport d'hydrocarbures	5
I.2.2 Caractéristiques des pipelines	6
I.3 Dégradation par corrosion dans les pipelines	6
I.3.1 Comprendre le processus	6
I.3.2 Pertes de métal dues à la corrosion interne	7
I.3.3 Pertes de métal dues à la corrosion externe.....	8
I.3.3.1 Corrosion des aciers par les sols	8
I.3.4 La corrosion uniforme	9
I.3.5 La corrosion localisée.....	9
a- Corrosion par piqûres.....	9
b- Corrosion galvanique.....	10
I.3.6 Piles dues à l'électrolyte	10
I.3.8 Corrosion microbiologique	11
a- Corrosion due aux bactéries sulfato-réductrices	11
b- Corrosion due à des bactéries acidogènes	12
c- Corrosion due aux bactéries oxydant le fer et le manganèse	12
I.4 Lutte contre la corrosion	12
I.4.1 Protection par le choix correct des matériaux	12
I.4.2 Conception et tracé des assemblages	13
I.4.3 Action sur le milieu de corrosion	14
I.4.4 Protection par modification du milieu corrosif	14
I.4.5 Protection par revêtement.....	14
I.4.6 Revêtement non métallique	14
I.4.7 Revêtements métalliques.....	14
a) Revêtement de surface d'un métal de base par un métal plus noble	15

b) Revêtement de surface d'un métal de base par un métal moins noble.....	15
I.5 Protection cathodique.....	15
I.5.1 Principes de la protection cathodique.....	15
I.5.2 Méthodes d'application de la protection cathodique.....	16
I.5.3 Effets nuisibles de la protection cathodique.....	17
I.5.3.1 Décollement du revêtement	17
CHAPITRE II: Recueil et analyse préliminaire de données expérimentales	
.....	19
II.1 Classification des variables	21
II.2 Présentation des données	21
II.2.2 Série statistique double (ou Multiple).....	23
II.3 Exclusion des observations anormales	23
II.4 Reconstitution des données manquantes	25
CHAPITRE III: Application au tronçon Haoued Elhamra	
.....	27
III.1 Détection des fuites	28
III.1.1 Méthodes de détection des défaillances CND	28
III.1.1.1 Détection des défauts par ultrasons de la ligne GZ1.....	29
III.2 Analyse des données par outil intelligent (pétrole brut de Haoud el Hamra)	30
III.2.1 Analyse monovariée des données de l'outil intelligent	30
III.2.1.1 Analyse en fréquence de la variable qualitative type de corrosion.....	30
III.2.1.2 Analyse en fréquence des variables quantitatives.....	31
III.2.2 Analyse multivariée des données de l'outil intelligent.....	37
III.2.2.1 Relation « orientation » et « type de corrosion »	37
III.2.2.2 Relation Résultats de l'épaisseur mesurée et reste du métal outil intelligent	40
III.2.2.3 Caractéristiques du défaut(CPR) par l'outil.....	41
III.3 Conclusion.....	42
CONCLUSION GÉNÉRALE	43
RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	44

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Lignes de transport des oléoducs et gazoducs.....	5
Figure I.2: Schéma simplifié du processus de corrosion (Destruction de l'équilibre par réaction du milieu).	7
Figure I.3: Corrosion interne du métal.	7
Figure I.4: Pertes de métal dues à la corrosion externe.....	8
Figure I.5: Diagramme de Pourbaix du fer – H ₂ O	16
Figure I.6: Principe de protection cathodique par source de courant externe (Courant imposé)	17
Figure I.7: Décollement par processus cathodiques.....	18
Figure III.1: Dégâts causés par les fuites des hydrocarbures des pipelines.....	28
Figure III.2: L'outil intelligent MagneScan HR	29
Figure III.3: Histogramme représente les types de corrosion.....	31
Figure III.4: Histogramme représente orientation de chaque intervalle	33
Figure III.5: Histogramme de la largeur de chaque intervalle	37
Figure III.6 : Histogramme représente la variation de l'orientation en fonction de type de la corrosion.....	38
Figure III.7: Histogramme représente le type de la corrosion en fonction de l'orientation en longueur.....	39
Figure III.8: Histogramme représente les résultats d'analyse	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1: Lois pour calcule le nombre de donnée.	24
Tableau II.2: Tableaux de comparaison de test de Grubbs.....	24
Tableau III.1: Résultats de l'analyse en fréquence de variable type de corrosion.....	31
Tableau III.2: Résultats de calcul sur Exel des statistiques descriptives de variable quantitative.	32
Tableau III.3: Fréquence de variable orientation en degré.....	32
Tableau III.4: Discrétisation de orientation en longueur.....	33
Tableau III.5: Statistiques descriptives pour la variable profondeur.....	34
Tableau III.6: Discrétisation de variable profondeur.	34
Tableau III.7: Résultats de calcul sur Exel de variable quantitative "longueur".....	35
Tableau III.8: Fréquence de variable longueur de la corrosion.....	35
Tableau III.9: Résultats de calcul sur Excel des statistiques descriptives de variable quantitative "longueur de corrosion"	36
Tableau III.10: Discrétisation de variable longueur	36
Tableau III.11: Tableau croisé de l'orientation et les types de corrosion	37
Tableau III.12: Discrétisation des deux variables quantitative qualitative.....	39
Tableau III.13: Résultats de l'analyse des données de tronçon.	40
Tableau III.14: Résultats de l'analyse de résultat de tronçon	42

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le transport des hydrocarbures sur de longues distances, du point de gisement jusqu'aux complexes de séparations, liquéfaction et aux raffineries s'effectue majoritairement par des canalisations enterrées recouvertes d'un revêtement en bitume ou en polymère complétée par une protection cathodique active permettant de les protéger contre la corrosion provoquée par les sols. Cependant des défaillances par corrosion et par fissuration qui peuvent se produire dans certaines conditions entraînent des perturbations dans l'exploitation du pipeline.

Le souci qui préoccupe les exploitants des réseaux de transport des hydrocarbures est d'assurer leur maintenance pour préserver la sécurité des populations ainsi que l'impact peut avoir une défaillance majeure sur l'aspect environnemental. La prévention des ruptures est donc une nécessité et est réalisée par une inspection et analyse de la nocivité des défauts constatés. Actuellement on envoie dans la canalisation un outil intelligent qui permet de collecter des données sur l'état interne et externe du pipeline.

L'objectif de ce mémoire l'utilisation des méthodes multivariées pour analyser des données obtenues lors du passage de cet outil dans le tronçon puits- HAOUD EL HAMRA
Notre travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre dresse quelques rappels sur la corrosion. Les différents types de corrosion ont été abordés. Un aperçu général sur les méthodes de protection des pipelines a été donné.

Dans le deuxième chapitre on a présenté quelques notions générales sur l'analyse des données. Les méthodes de présentation des données ont été données.

Le troisième chapitre a été consacré à l'application de ces méthodes au tronçon HAOUD ELHAMRA. Après analyse préliminaire des données recueillis par l'outil et convertis sur Excel des calculs ont été réalisés en utilisant Excel et Statistica. Les calculs réalisés ont été effectués sur recommandation d'un expert Sonatrach de la maintenance et de la réparation des pipelines.

CHAPITRE I:

Étude Bibliographique

I.1 Introduction

Depuis des siècles, le besoin de l'énergie tel que le gaz naturel et le pétrole ne cesse de s'accroître avec le développement très rapide des pays. Ce qui nécessite l'exploitation des gisements et la construction de nouvelles lignes de pipelines.

Le gaz naturel est transporté par des pipelines appelés gazoducs qui est un système de canalisation à haute pression, enterrées recouvertes d'un revêtement en bitume ou en polymère et complétée par une protection cathodique active pour les protéger contre la corrosion provoquée par les sols. L'expansion de ce système est marquée non seulement par un accroissement des longueurs de canalisations en exploitation, mais aussi par une augmentation de leur diamètre.

Pour le transport de gaz sur des grandes distances, le recours à un réseau de tuyaux est un des moyens les plus couramment retenu. Mais, ces tuyaux sont souvent l'objet d'agressions corrosives interne et externe qui fait des craquelures et des déflagrations des pipelines dans le pire des cas.

Des recherches et des études bien précises s'accumule pour créer un outil intelligent qui inspecte les pipelines pour détecter tout type de corrosion possible par des analyses de ses données afin d'éviter des accidents tels que des explosions qui engendrent des pertes humaines dans certains cas et des pertes économiques.

I.2 Transport par canalisation

L'Activité Transport par Canalisations est un maillon important de la chaîne des hydrocarbures, d'un point de vue historique, stratégique et opérationnel.

L'histoire de SONATRACH a débuté avec cette activité lorsqu'elle s'est lancée dès 1966 dans la construction du premier oléoduc algérien, l'OZ1, d'une longueur de 805 KM, reliant Haoud El Hamra à Arzew.

Depuis ce réseau de transport par canalisations ne cesse de s'intensifier et de se complexifier en fonction du développement des activités de l'Amont et de l'Aval pétrolier et gazier de SONATRACH, en national et en international.

Actuellement, l'Activité transport par canalisations assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, gaz naturel, GPL et condensât) depuis les champs de production

Chapitre I: Étude Bibliographique

jusqu'aux complexes et unités de traitements, de transformation, de stockage, d'expédition et d'exportation (Figure I.1).

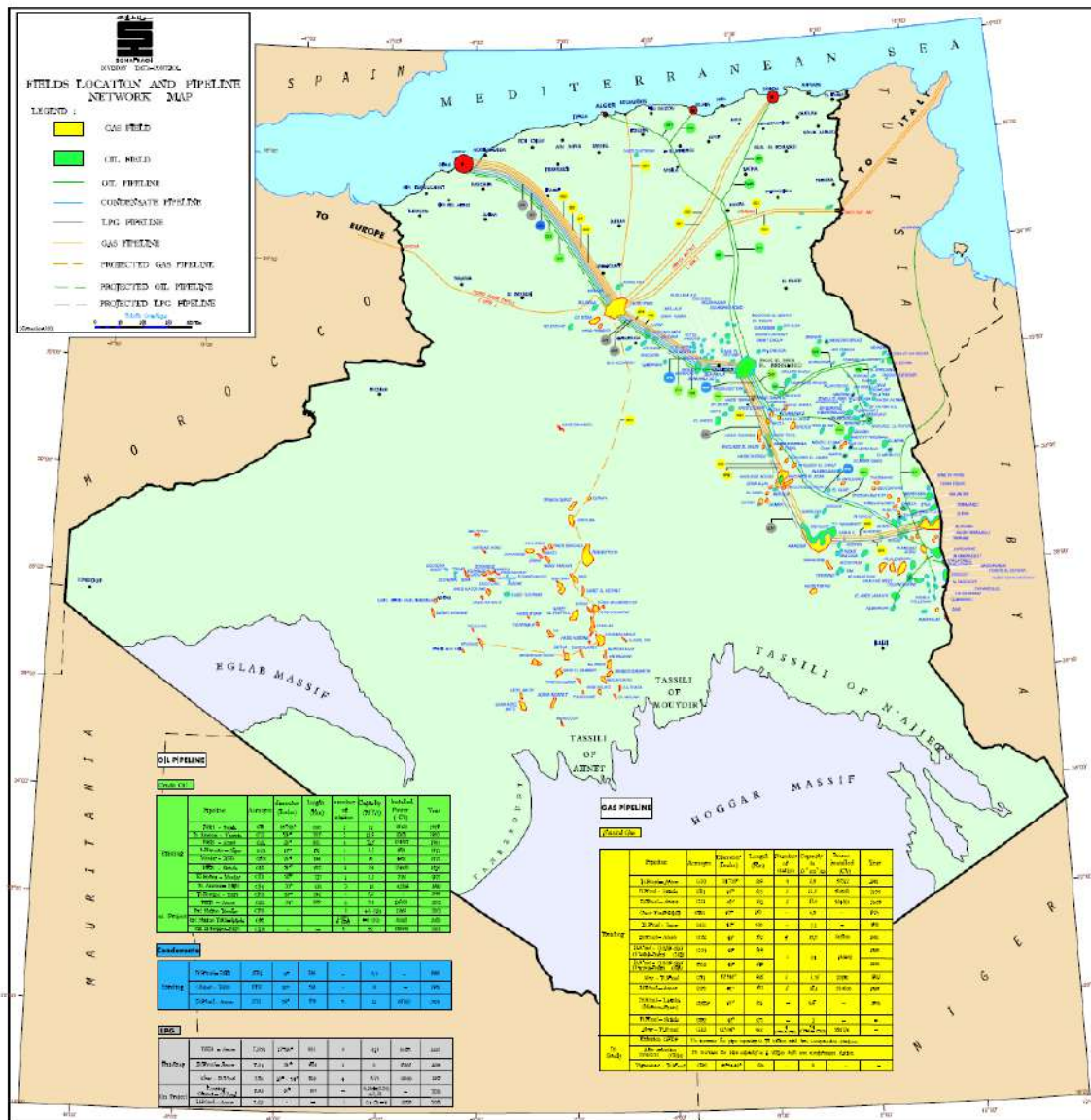


Figure I.1: Lignes de transport des oléoducs et gazoducs [1].

I.2.1 Les pipelines destinés au transport d'hydrocarbures

On désigne par « pipelines », les oléoducs ou gazoducs qui sont des canalisations de diamètres pouvant aller de 1 à 42'', voire plus. Celles-ci sont le plus souvent en acier, constituées d'éléments linéaires soudés bout en bout, et dans lesquelles transitent, sous des pressions relativement élevées, des produits pétroliers, liquides ou gazeux. Ces produits pétroliers sont propulsés par des installations de pompage ou de compression [1].

I.2.2 Caractéristiques des pipelines

Le développement des transports à grande distance de quantités importantes d'hydrocarbures a nécessité l'emploi des tubes de grand diamètre, exploités à des pressions plus élevées. Pour éviter d'atteindre des épaisseurs difficiles à souder et faire des économies d'acier, on a eu recours à de nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques améliorées. C'est ainsi qu'on a vu apparaître les grades X60, X65, X70, X80 et même X100. Les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes : aciers au carbone faiblement alliés et aciers à faible teneur en carbone. Dans le premier groupe on trouve les aciers ferrito-perlitique X42 à X52 (selon API) renfermant jusqu'à 0,3 % C, 1,6 % Mn, 0,7 % Si. Dans le deuxième groupe on trouve les aciers ferrito-perlitiques faiblement alliés à basse teneur en carbone X56, X50, X65, X70 renfermant 0,12 % C, 0,45 % Si, 0,25 % S, 1,9 % Mn, 0,1 % V, 0,1Nb, 0,015 % Al. Pour les conduites de diamètre supérieur à 1020 mm, destinée à fonctionner sous des pressions élevées, on utilise généralement des tubes en acier de laminage contrôlé. Les propriétés mécaniques des structures ferrito-perlitique peuvent être modifiées, entre autre par l'affinement des grains ferritiques [3].

I.3 Dégradation par corrosion dans les pipelines

I.3.1 Comprendre le processus

Le terme « corrosion » désigne la destruction d'un métal sous l'action du milieu environnant (Air, eau, solution aqueuse, sols ...) par un processus de type physicochimique.

La norme ISO 8044 définit la corrosion comme suit : "La corrosion est une interaction Physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs...".

En ce qui concerne la corrosion des pipelines, le métal est de l'acier. La corrosion de ce dernier est un phénomène naturel et courant, où les molécules de fer sont transformées en des formes d'hydroxydes ferreux. Le processus de la corrosion peut être décomposé en deux réactions anodique et cathodique (Figure I.2) [2].

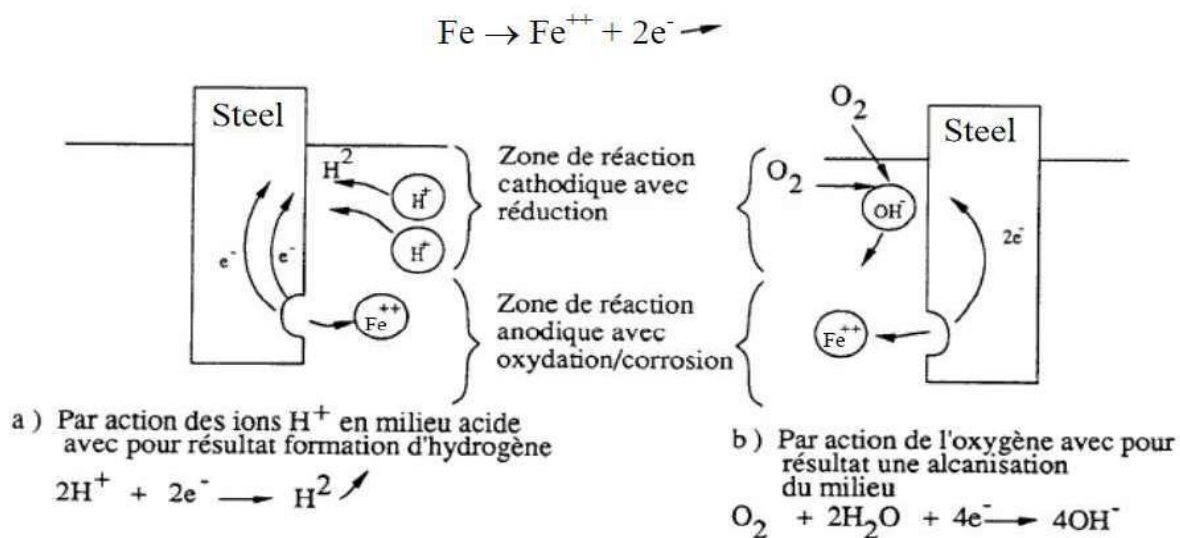


Figure I.2: Schéma simplifié du processus de corrosion (Destruction de l'équilibre par réaction du milieu).

I.3.2 Pertes de métal dues à la corrosion interne

Les pertes de métal sont provoquées le plus souvent par des attaques chimiques de la surface interne de la conduite (figure I.3). Ce type de corrosion est favorisé par la présence de sulfure d'hydrogène et de dioxyde de carbone dans le gaz et la présence de bactéries sulfato-réductrices (BSR) dans le cas des oléoducs (Figure I.3) [2].



Figure I.3: Corrosion interne du métal.

I.3.3 Pertes de métal dues à la corrosion externe

Ces pertes de métal sont provoquées le plus souvent par des phénomènes de type électrochimique et chimique de la surface externe de la conduite (Figure I.4). Les principaux facteurs favorisant ce type de corrosion sont :

- Les défauts de revêtement de la conduite ;
- Les insuffisances du système de protection cathodique;
- L'agressivité du sol (sol de faible résistivité électrique).



Figure I.4: Pertes de métal dues à la corrosion externe.

I.3.3.1 Corrosion des aciers par les sols

Le sol environnant est un des indicateurs du risque de corrosion externe des conduites métalliques enfouies. Il dépend non seulement de son caractère minéralogique mais de sa teneur en humidité, pH, composition chimique, résistivité et aération. Selon Trabenelli et al [3], le sol peut être considéré comme un système hétérogène de pores avec des caractéristiques colloïdales, l'espace entre les particules du sol peut être rempli avec de l'eau ou du gaz. La corrosivité du sol est considérée comme la capacité de l'environnement à produire et à développer le phénomène de corrosion. Le sol est défini comme un électrolyte et ceci peut être compris au moyen de la théorie électrochimique. La mesure de l'agressivité des sols pour les métaux peut être déduite de la mesure de leur résistivité électrique. C'est le critère d'appréciation le plus fréquemment utilisé. Les sols constituent un puissant moyen

d'épuration et de recyclage des eaux. Le complexe argilo-humique confère des propriétés d'adsorption et d'échange : le sol constitue un système accumulateur de substances très diverses. L'adsorption moléculaire et la rétention des micropolluants organiques dans les sols sont plus ou moins fortes et plus ou moins réversibles. La nature de la molécule détermine son pouvoir de rétention, par son poids moléculaire, par sa charge, par la conformation de la molécule et son affinité à établir des liaisons covalentes, par sa solubilité dans l'eau. La capacité d'adsorption ionique et la rétention des cations (Ca, Mg, K, Na) du sol varient essentiellement en fonction de son épaisseur, de sa teneur en argile et en matières organiques [4].

I.3.4 La corrosion uniforme

La forme de corrosion la plus courante est celle qui affecte les structures métalliques par une attaque généralisée et uniforme se traduisant par la présence de produits de corrosion à la surface du métal et par une perte de matière uniformément répartie.

I.3.5 La corrosion localisée

La corrosion localisée est basée sur le même principe comme la corrosion uniforme, bien que le potentiel d'entraînement puisse être assuré par des mécanismes différents. Elle est caractérisée par la distinction claire des endroits anodiques et cathodiques. En outre, la cathode peut être plus grande de plusieurs ordres de grandeur que l'anode, ce qui augmente considérablement la vitesse de corrosion de l'anode. Donc, ce type de corrosion se manifeste par une attaque localisée pouvant entraîner des dommages très importants (perforation de Conduite), sans que le métal présente dans son ensemble une perte de poids significative. Ils existent différents types de mécanismes de corrosion localisée [5] :

a- Corrosion par piqûres

C'est un type de corrosion, qui se traduit à la surface du métal par la formation des trous, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur. Dans les tubes en acier, l'origine des piqûres est liée à la présence d'hétérogénéité, qui en surface, détermine la formation de piles locales. Bien que la quantité d'acier corrodée soit faible, ce type de corrosion est très dangereux car il se produit en profondeur et peut conduire à la perforation des conduites même épaisses. L'hétérogénéité de la surface est due à des défauts du film passif (revêtement) qui favorisent la mise à nu locale d'acier, il en résulte la formation d'une micro-pile entre

l'acier mis à nu qui joue le rôle d'anode, donc se corrode et l'acier passif qui constitue la cathode.

b- Corrosion galvanique

Appelée aussi corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux en contact et entraîne une corrosion du métal le moins noble (anode) avec une résistance à la corrosion du métal le plus noble (cathode).

I.3.6 Piles dues à l'électrolyte

Quelques recherches ont montré que la texture du sol joue aussi un rôle dans la formation de piles de corrosion sur les conduites [6]. Ce sont les piles créées par les hétérogénéités du sol qui engendrent sur un ouvrage métallique pourtant parfaitement homogène, des différences de potentiel locales, donnant naissance à un courant qui conduit à l'oxydation de la partie la plus négative du métal.

Les zones les moins aérées sont des zones anodiques par rapport au reste de l'ouvrage et se corrodent donc plus facilement.

C'est ainsi que s'expliquent les corrosions des pieux métalliques sous la ligne d'eau, le creusement jusqu'au percement, de cavités mal aérées, ou bien la corrosion d'un ouvrage recouvert de façon discontinue par des oxydes, de la calamine, ou d'autres dépôts. Ce phénomène est responsable des corrosions situées sur la génératrice inférieure des tubes en fond de fouille, là où l'oxygène de l'air diffuse le moins, ainsi que des corrosions qui apparaissent au niveau des sols dont l'aération n'est pas la même en tout point (sable ou cailloux et argile par exemple).

Les piles géologiques sont caractéristiques des actions qui peuvent se développer sur une conduite, ouvrage de grande longueur, traversant des sols de compositions très différentes, lui conférant des potentiels locaux différents.

En général, les sols argileux, marécageux et les terrains humides constituent des zones anodiques vis à vis des autres terrains.

I.3.7 Corrosion par les courants vagabonds

Les lignes de transport à traction électrique sous courant continu (S.N.T.F. - tramways, métro), propagent généralement dans le sol des courants dits vagabonds .En effet, le courant amené par la caténaire, qui peut pour certains trains être de plusieurs milliers d'ampères, retourne à la sous-station émettrice par le rail de roulement. Ce rail plus ou moins bien éclissé, plus ou moins bien isolé du sol selon l'état du ballast, laisse s'échapper une partie importante du courant qui peut alors emprunter, sur des parcours de dizaines de kilomètres, des circuits peu résistants électriquement, tels que les conduites, avant de regagner le rail et le générateur à proximité de la sous-station.

A l'endroit où les courants vagabonds quitteront la conduite pour retourner au rail, une corrosion du métal se produira inévitablement. L'importance de la corrosion est directement proportionnelle aux intensités mises en jeu (la Loi de Faraday donne pour l'acier une consommation d'environ 10 kg par ampère et par an). Or, il n'est pas rare de voir transiter des courants de plusieurs dizaines d'ampères dans les conduites. Les pertes de métal se chiffrent alors en grammes par heure, et des percements de conduites peuvent alors se produire en quelques semaines. On pourrait trouver des cas où ce phénomène s'est produit avant même que la conduite ne soit en service et que les moyens de lutte contre la corrosion n'aient été mis en œuvre [7].

I.3.8 Corrosion microbiologique

La corrosion microbienne est la conséquence d'interactions qui se manifestent entre des bactéries et les matériaux sur lesquels elles se sont fixées. Ce phénomène qui se produit dans des eaux privées d'oxygène, en présence de sulfates et de bactéries réductrices du soufre, lesquelles réduisent les sulfates à l'état de sulfures, avec libération d' H_2S qui attaque les matériaux avec lesquels l'eau est en contact en causant la détérioration de pipelines. L'attaque corrosive peut être très rapide et avoir des conséquences très graves à savoir percement entraînant des fuites et même des ruptures sur les conduites [8].

On distingue plusieurs types de corrosion microbiologique :

a- Corrosion due aux bactéries sulfato-réductrices

Les bactéries responsables de ce type de corrosion sont principalement des Désulfovibrio, des Désulfomonas et des Désulfomaculatum. Ce sont des bactéries anaérobies capables de

transformer les sulfates et les sulfites en sulfures. La présence de ces bactéries dans divers lieux corrodés est attestée par l'odeur particulière que dégagent les sulfures accumulés [9].

b- Corrosion due à des bactéries acidogènes

Le métabolisme de très nombreuses bactéries conduit à la libération transitoire d'acides organiques (*Clostridium*), mais aussi d'acides minéraux (*Thiobacillus*, Thiooxydants), dont le résultat est une diminution sensible du pH du milieu. Cette acidification entraîne une accélération de la corrosion par des processus chimiques [10].

c- Corrosion due aux bactéries oxydant le fer et le manganèse

Ce sont surtout les bactéries micro aérobie des genres *Gallionella*, *Sphaerotilus*, *Crenothrix*, et *Leptothrix* qui oxydent les ions ferreux Fe^{2+} en ions ferriques Fe^{3+} . Ces bactéries sont responsables de points de corrosion, particulièrement sous des dépôts et des incrustations. Cette corrosion est accentuée en présence de chlore et d'oxygène dissous [10].

I.4 Lutte contre la corrosion

La lutte contre la corrosion doit être une préoccupation constante, depuis la conception des équipements jusqu'à leur entretien au quotidien. Si les moyens à mettre en œuvre sont variés et dépendent en grande partie des situations d'utilisation.

En particulier le but recherché est d'enrayer la dégradation des équipements pour augmenter la durée de leur vie, en empêchant que se produisent les réactions électrochimiques qui entraînent une dissolution et une attaque du métal [11].

Les pipelines sont fabriqués généralement en acier au carbone en raison de son faible coût et sa bonne résistance à la pression interne exercée par le fluide. La détérioration des pipelines n'est pas seulement occasionnée par des agressions mécaniques externes fortuites, mais aussi par la corrosion de l'acier par le milieu sol. Pour protéger les pipelines contre la corrosion, on recouvre l'acier d'un revêtement isolant qui joue le rôle de couche barrière et on applique une protection cathodique [12].

I.4.1 Protection par le choix correct des matériaux

Le concepteur soucieux d'éviter la corrosion choisit avant tout des matériaux qui ne se dégradent pas dans leur environnement ou qui se corrodent de façon uniforme afin qu'on puisse connaître le plus exactement possible la durée de vie utile de l'équipement. Il faut en outre porter une attention spéciale aux conditions d'utilisation (Matériau, milieu corrosif,

contraintes, etc.) qui entraînent des types particulièrement pernicious de corrosion, comme la corrosion sous tension ou la corrosion par piqûres.

Les aciers inoxydables résistent à la corrosion dans beaucoup de milieux, toutefois dans certains cas, leur emploi peut s'avérer désastreux.

Pour le choix des matériaux, différentes combinaisons favorables de matériau et d'environnement sont possibles [11]:

- Aciers ordinaires en milieu sulfurique concentré
- Nickel et cuivre en milieu acide non oxydant
- Nickel et alliage de nickel en milieu fortement alcalin
- Plomb en milieu sulfurique dilué
- Aluminium en milieu neutre Cu légèrement acide (sans chlorures)
- Etain en présence de l'eau pure

On peut améliorer la résistance à la corrosion des métaux par :

- Des éléments d'addition
- Un raffinage plus poussé du métal pour diminuer la teneur en phosphore et soufre des aciers, en carbure dans les aciers inoxydables
- Un recuit de relaxation des tensions internes

I.4.2 Conception et tracé des assemblages

Avant d'utiliser les méthodes de protection (protection anodique, protection cathodique, revêtements. Inhibiteurs de corrosion, etc.), il faut lutter contre la corrosion dès le début, c'est à dire à la table de dessin. Une procédure correcte en bureau d'étude devrait toujours respecter certaines conditions. Les règles à respecter sont aussi nombreuses que variées, car chaque assemblage est un cas d'espèce, on peut classer comme suit:

- Eviter la formation des couples galvaniques entre les métaux différents
- Eviter la formation d'interstices dans les assemblages
- Eviter l'accumulation d'eau stagnante ou de résidu de boue
- Eviter, dans les conduites. les changements brusques de section
- Eviter les points chauds et les gradients de température qui créent des couples thermogalvaniques.

I.4.3 Action sur le milieu de corrosion

On peut exercer une action sur le milieu essentiellement en modifiant la cinétique de Corrosion. Ce type de protection ne peut par conséquent s'appliquer qu'à un système fermé [11].

I.4.4 Protection par modification du milieu corrosif

- par élimination des agents corrosifs ;
- Diminution du pouvoir oxydant de l'électrolyte ;
- Par addition d'inhibiteurs de corrosion;

I.4.5 Protection par revêtement

Un revêtement ayant pour fonction d'isoler le métal du milieu corrosif il doit être Continu, adhérent et inerte par rapport à l'environnement

I.4.6 Revêtement non métallique

Les revêtements non métalliques sont soit des peintures, soit des polymères, soit des goudrons.

En ce qui concerne les peintures, il faut en appliquer au moins deux types différents: une couche de fond et des couches de finition. La peinture utilisée pour les couches de fonds doit mouiller parfaitement la surface à peindre et y adhérer fortement. Ces peintures contiennent souvent des poudres de zinc ou d'aluminium, qui agissent comme anode, ou des pigments (chromates de zinc) , qui peuvent jouer le rôle d'inhibiteur.

Les polymères utilisés comme revêtements sont soit thermoplastiques, soit thermodurcissables.

Les revêtements doivent être continus et adhérents, toutefois en pratique et en cours d'utilisation, ils ne le sont jamais parfaitement. C'est pourquoi, afin de minimiser les risques de corrosion, il faut prévoir les moyens de protection supplémentaires, comme la protection cathodique (structures enfouies) [11].

I.4.7 Revêtements métalliques

Par rapport au métal à protéger, les revêtements métalliques peuvent être soit anodiques, soit cathodiques. Ainsi le zinc, qui est anodique par rapport à l'acier, joue le

rôle d'anode sacrificielle dans les pièces en tôles galvanisées. Le chrome, par contre, est cathodique par rapport à l'acier; par conséquent, au niveau de chaque discontinuité du revêtement, il y a corrosion de l'acier sous la couche de chrome [11].

a) Revêtement de surface d'un métal de base par un métal plus noble

Des revêtements métalliques plus nobles que l'acier au carbone sont le chrome, le cuivre, le nickel. Ces revêtements de ce type sont appelés cathodiques. Les métaux plus nobles que l'acier peuvent accélérer une corrosion locale de substrat aux défauts de revêtement.

b) Revêtement de surface d'un métal de base par un métal moins noble

Les métaux moins nobles que le substrat exercent une action de protection cathodique (par exemple Zn), le métal de surface joue le rôle d'une anode sacrificielle par rapport au métal de base..

I.5 Protection cathodique

La corrosion des métaux au contact des milieux électrolytiques aqueux est de nature électrochimique. L'application de la technique de protection cathodique a pour but de diminuer la vitesse de corrosion du métal telle qu'elle devienne négligeable eu égard à sa durabilité nécessaire.

Selon la norme EN 12954 : 2001 (et ISO 15589-1 : 2003), le potentiel électrochimique de la structure par rapport au sol, doit être de telle sorte que la vitesse résiduelle de corrosion du métal soit inférieure à $10 \mu\text{m an}^{-1}$, soit 1 mm de perte d'épaisseur en un siècle [12].

I.5.1 Principes de la protection cathodique

L'application de la méthode de protection cathodique est bien visualisée grâce à l'interprétation des diagrammes de Pourbaix, qui permettent de repérer les conditions de potentiel électrochimique et de pH correspondant à la stabilité thermodynamique des différents états du fer que l'on peut rencontrer en solution aqueuse (Figure I.5).

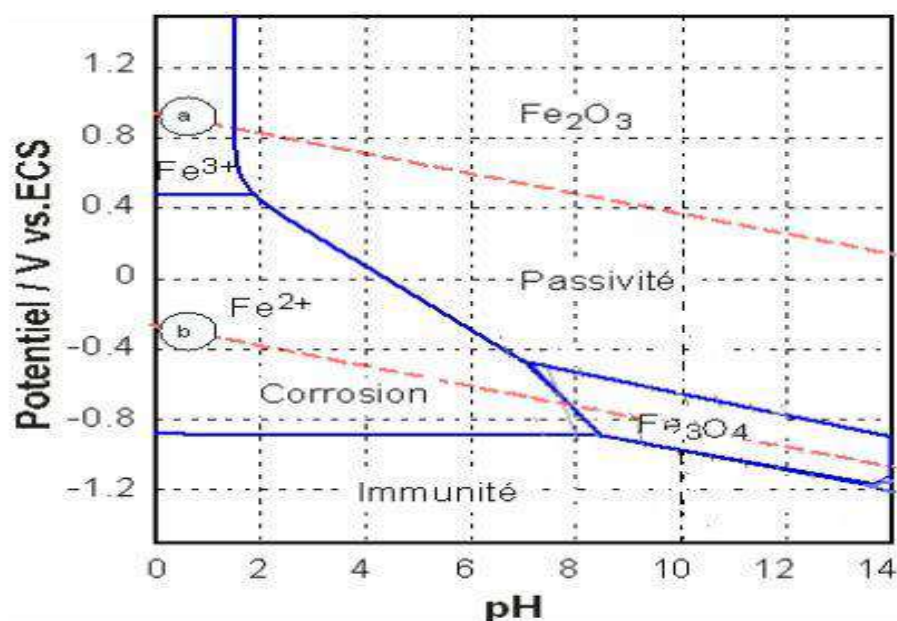


Figure I.5 : Diagramme de Pourbaix du fer – H₂O

La protection cathodique consiste à polariser l'acier au carbone ou le fer dans le domaine de la stabilité thermodynamique du Fe en état métallique (indiqué Fe dans le diagramme ci-dessus). Cet état est également appelé « Immunité ». Ce diagramme montre que le fer (ou l'acier) doit être polarisé à un potentiel inférieur à -0.78 V par rapport à ECS (Electrode au Calomel Saturé) pour un milieu acide ou neutre.

I.5.2 Méthodes d'application de la protection cathodique

Deux méthodes différentes de protection cathodique peuvent être réalisées en pratique

Protection par anodes sacrificielles : l'acier est polarisé dans le domaine de l'immunité (du fer) par un couplage galvanique avec un métal ou un alliage ayant un potentiel de corrosion suffisamment négatif. Les coques de navire ou les structures off-shore sont souvent protégées avec des anodes sacrificielles constituées d'un alliage de Mg, Zn ou Al.

Méthode par soutirage de courant (ou courant ou potentiel imposé) : Le système à protéger est couplé avec une alimentation électrique externe continue permettant de polariser le fer ou l'acier dans le domaine de l'immunité. Cette méthode est souvent employée pour la protection de canalisations en acier enterrées.

Puisque la conduite de gaz, l'objet du présent mémoire, est rarement protégée par anode sacrificielle, nous illustrons le cas de protection par courant imposé. On utilise une source d'énergie externe (en général le réseau électrique alternatif basse tension) pour alimenter un générateur de courant (doté d'un redresseur et d'une alimentation stabilisée en tension) pour protéger le métal par polarisation cathodique. La structure à protéger est connectée à la borne

négative du générateur de courant, la borne positive étant raccordée à une électrode externe enterrée à proximité de la canalisation (« anode » encore appelée « déversoir »). Ce générateur de courant est alors réglé de manière à maintenir la structure à protéger dans la "zone d'immunité" comme l'illustre la (figure I.6).

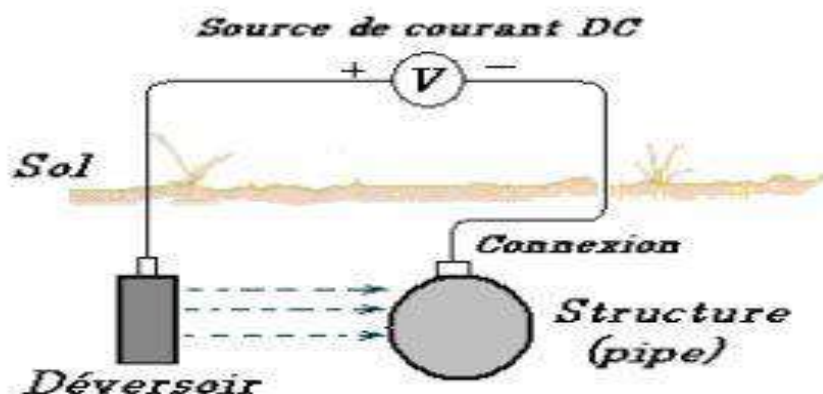


Figure I.6: Principe de protection cathodique par source de courant externe (Courant imposé).

I.5.3 Effets nuisibles de la protection cathodique

Il est important de noter que la surprotection cathodique (le potentiel ou le courant de protection excessif) est nuisible car il peut conduire au décollement du revêtement protecteur, à la fragilisation par hydrogène de la conduite en acier ou encore à la dissolution du fer par la formation et la dissolution, en cas de conditions de polarisation extrêmement excessives, de l'hydroxy-anion par son caractère amphotère. Nous allons détailler ces trois phénomènes.

I.5.3.1 Décollement du revêtement

Pour éviter un décollement cathodique du revêtement, la norme NF EN 14161 : 2004 dicte « qu'il convient que le potentiel de protection au niveau de l'interface métal / milieu ne soit pas plus négatif que $-1,15 \text{ V/Cu/CuSO}_4$ (une électrode de référence basée sur le potentiel rédox du couple Cu/Cu^{2+} utilisée en pratique sur le terrain). Des valeurs plus négatives sont acceptables à condition qu'il soit démontré que l'endommagement dû à la fragilisation par hydrogène ne peut avoir lieu ». D'après Shepherd [5], le potentiel cathodique extrême à appliquer serait de $-1,5 \text{ V/Cu/CuSO}_4$ pour les canalisations recouvertes de polyéthylène. Toutefois il convient de souligner qu'en pratique, en milieu sol, du fait de l'intervention de la réduction de l'eau à potentiel suffisamment électronégatif et du fait des effets de chute ohmique, il est souvent difficile d'atteindre des potentiels interfaciaux aussi bas.

Chapitre I: *Étude Bibliographique*

Le phénomène de décollement cathodique peut être scindé en trois étapes pour le revêtement perméable ou ayant des défauts traversants. La première étape correspond au transport des espèces (eau, oxygène) vers la surface de l'acier par la pénétration de vapeur d'eau et d'oxygène dans le revêtement. La deuxième étape est la réduction de l'oxygène dissous et de l'eau au niveau de l'interface métal-solution. Or, selon les réactions suivantes la réduction de l'oxygène dissous (Eq 1.1) ou de l'eau (Eq 1.2) rendent le milieu au voisinage de la surface plus alcalin.



Par ces réactions, le pH du milieu, selon certains auteurs, peut atteindre une valeur proche de 14. En troisième étape, cette alcalisation du milieu provoque la dégradation des liaisons entre le revêtement et le métal.

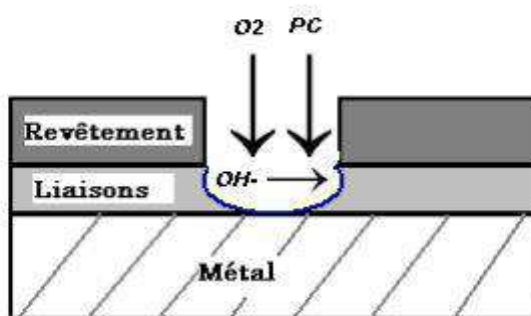


Figure I.7: Décollement par processus cathodiques

CHAPITRE II:

Recueil et analyse préliminaire de données expérimentales

Il existe deux façons de recueillir les données initiales : l'expérience active et l'expérience passive.

Dans le premier cas il s'agira de créer des perturbations artificielles dans le système suivant un plan préétabli et puis de noter les valeurs des paramètres d'entrée et de sortie.

La deuxième possibilité consiste à enregistrer les données nécessaires lors de l'exploitation normale du système. Il est évident que la première méthode est plus intéressante car elle permet de collecter des informations dans un espace d'expérimentation plus vaste et partant, d'élargir les horizons d'application du modèle. L'inconvénient majeur de cette méthode est que son utilisation pour la modélisation des systèmes complexes est pratiquement impossible.

Par contre les journaux d'exploitation, disponibles dans toutes les unités, fournissent une importante quantité de données. Ces données représentent en fin de compte, le résultat d'expériences passives réalisées depuis l'entrée du système en exploitation.

Les données ainsi collectées peuvent contenir des observations inexacts, dues à des erreurs aléatoires, à des lectures incorrectes des indications des instruments de mesure, ...etc. C'est pourquoi, avant d'être utilisées pour l'élaboration du modèle, ces données doivent d'abord subir un **traitement statistique préliminaire**.

Dans ce but il est nécessaire de réaliser les étapes suivantes :

- présentation des données ;
- analyse des observations extrêmes et exclusion des données anormales ;
- reconstitution des données manquantes ;
- test d'indépendance stochastique des observations ;

Les tests statistiques peuvent être divisés en deux groupes :

- les tests simples mais peu précis autorisant un seuil de signification d'environ 5 % (il y a une chance sur vingt pour que le résultat du test soit faux) ;
- les tests complexes et très exacts autorisant un seuil de signification de 1% et moins.

L'utilisation de tests simples se justifie seulement pour le cas où l'application de méthodes plus discriminantes ne serait pas nécessaire. L'avantage des tests élémentaires réside dans leur application facile sans calculs fastidieux, d'où un gain de temps appréciable surtout lorsqu'il s'agit de résoudre des problèmes nécessitant une prise de décision rapide (modèles de commande opérationnelle par exemple).

II.1 Classification des variables

On distingue deux types de variables (ou de données) :

- variable quantitative : variable dont la mesure peut être associée à un nombre et telle que la relation d'ordre est préservée : température ; pression ; débit ; nombre de pompes ...

Elle peut être continue (température) ou discrète (nombre de pompes).

- variable qualitative : variable dont la mesure est une qualité (non ordonnée).
Exemple : sexe ; langues parlées dans un pays ; type de station pompage du pétrole ou du condensat ou bien de compression ; type de corrosion externe ou bien interne ...

Ces variables peuvent prendre donc plusieurs modalités (codes).

II.2 Présentation des données

C'est une étape très importante dans le traitement des données. Une bonne présentation facilitera la compréhension et l'interprétation des données. En fonction du nombre de séries de données (simple ou multiple) et de la nature des variables (qualitatives ou quantitatives).

On distingue deux grands types de présentation :

a- Tableaux : -tableau de fréquence

- tableau de corrélation

- tableau de contingence

b- Figures : - diagramme en bâtons

- Histogramme

- polygone de fréquence

- Diagramme de dispersion.

Le choix de la méthode de présentation des données est fait selon le type de la série statistique (simple ou multiple) et de la variable (qualitative, quantitative, discrète ou continu).

II.2.1 Série statistique simple

Une seule variable est mesurée sur chaque élément. Les représentations à utiliser sont :

a) Variables qualitatives :

- **Tableau de distribution de fréquence** : on utilise directement les différents états (modalités) que peut prendre la variable comme classe.

- **Diagramme en bâtons** : le tableau de distribution de fréquences précédent est utilisé pour la construction de la figure. Pour chaque modalité un bâton représente le nombre d'observations de l'échantillon ayant cette modalité

b) *Variable quantitative : discrète ou continu*

- **Tableau de distribution de fréquence** : il faut diviser la plage de variation de la variable en classe avant de construire le tableau de fréquence. Si :

* la variable est discrète on peut procéder de la même façon que pour une variable qualitative ;

* la variable est continue, alors on utilise une règle empirique pour déterminer le nombre de classes adéquats (Règle de Sturge et de Yule) ;

- **Histogramme** : C'est une représentation graphique de la distribution de fréquences d'une variable quantitative. L'histogramme permet une représentation claire où l'aire des rectangles représente fidèlement la fréquence de chaque classe.

- **Polygone de fréquences** : Le polygone de fréquences est une autre représentation graphique (en ligne brisée) de la distribution de fréquences d'une variable quantitative. Pour tracer le polygone, on joint les points milieu du sommet des rectangles adjacents par un segment de droite. Le polygone est fermé aux deux bouts en le prolongeant sur l'axe horizontal. Le polygone de fréquences peut être fort utile lorsqu'il s'agit de comparer plusieurs populations.

II.2.2 Série statistique double (ou Multiple)

Deux (ou plusieurs) variables sont mesurées sur chaque élément. Les présentations à utiliser sont :

- *Tableau de contingence* pour les variables qualitatives
- *Tableau de corrélation* pour les variables quantitatives ;
- *Figures* : diagramme de dispersion pour les variables quantitatives.

II.3 Exclusion des observations anormales

Dans une série d'observations, il peut sembler qu'un ou plusieurs nombres ne lui appartiennent pas. Une attitude classique, que l'on rencontre trop souvent, consiste à éliminer cette valeur en la considérant comme aberrante. En effet si on a pu retrouver la cause de la valeur aberrante (erreur de lecture, faute de calcul, faute de frappe, etc). Mais dans le cas où aucune erreur cause accidentelle n'a pas pu être détectée, il faut avoir recours à un test statistique permettant de justifier l'élimination de la valeur aberrante avec une probabilité p de se tromper. La probabilité retenue ici est de 5%.

NB : dans ce qui suit on va considérer des variables de type quantitatif continu.

Il existe de nombreux tests pour s'assurer si ces valeurs suspectes (appelées valeurs aberrantes) appartiennent bien à la série ou non.

Test 1 : on peut appliquer le test simple suivant :

- Identification des observations suspectes ;
- Calcul de la différence entre la plus grande valeur du groupe et la plus petite en tenant compte de l'observation suspecte : $d = y_{\max} - y_{\min}$;
- Même démarche que la précédente en excluant la valeur suspecte : $d^* = y_{\max} - y_{\min}$;
- Si $d > 2 d^*$, alors la valeur suspecte est à exclure.

Test 2 : Test De DIXON ou Test Q.

Le test de Dixon permet de déterminer si une valeur est **probablement** hors norme. Il s'applique pour des petits échantillons, n compris entre 3 et 30, et ne concerne **qu'une seule** valeur extrême.

NB : Si deux ou trois valeurs sont hors normes et proches, il est possible que le test ne le signale pas.

Il existe plusieurs versions de ce test. Celle qui a été retenue dans [13].

La procédure utilisée est la suivante :

Chapitre II: Recueil et analyse préliminaire de données expérimentales

- ordonner l'échantillon statistique dans l'ordre croissant ;
- calculer Q_1 ou bien Q_2 selon le nombre de données (Tableau II.1);
- Trouver $Q(P,n)$ dans la table où P est le niveau de confiance ;
- Si $Q > Q(P, n)$ l'hypothèse est rejetée avec le risque d'erreur $\alpha = 1-P$: la valeur sera déclarée aberrante ;
- si $Q \leq Q(P, n)$ la valeur ne sera pas déclarée aberrante ;

Tableau II.1: Lois pour calculer le nombre de donnée.

	<i>x_1 est douteux</i>	<i>x_n est douteux</i>
$n \leq 10$	$Q_1 = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$	$Q_1 = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$
$n > 10$	$Q_2 = \frac{x_3 - x_1}{x_n - x_1}$	$Q_1 = \frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_3}$

Test 3. Test de Grubbs

Ce test présente deux principaux intérêts [13] :

- Il permet le rejet de deux points aberrants dans une série de mesure ou bien celui d'une ou de deux moyennes par rapport à la moyenne générale ;
- Il est beaucoup plus puissant dans le cas de petits échantillons.

La procédure est la suivante :

- i- Comme pour le test de Dixon les valeurs sont classées par ordre croissant ;
- ii- On calcule les deux résidus normalisés G_1 et G_n et ramenés à des valeurs positives d'après la relation ci-dessous :

$$G_1 = \frac{m - x_1}{s} \quad \text{et} \quad G_n = \frac{x_n - m}{s}$$

Où m et s représentent respectivement la moyenne et la variance.

- iii- On compare les valeurs obtenues aux valeurs critiques à 5% et 1% :

Tableau II.2: Tableaux de comparaison de test de Grubbs.

<i>Si G_1 ou $G_n > G(\alpha=1\%)$</i>	<i>alors x_1 ou x_2 est aberrant ;</i>
<i>Si $G(\alpha=5\%) < G_1$ ou $G_n < G(\alpha=1\%)$</i>	<i>alors x_1 ou x_2 est douteux ;</i>
<i>Si G_1 ou $G_n < G(\alpha=1\%)$</i>	<i>alors x_1 ou x_2 est non aberrant</i>

Test 4.

Un test plus discriminant consiste à utiliser le critère de **Student**. Pour cela on divise la série mère des observations en deux sous séries, l'une se composant des observations extrêmes et l'autre des observations normales.

Le test consiste à déterminer s'il y a une différence significative entre les deux sous séries :

$$t_c = \frac{a}{b} \text{ avec}$$

$$a = (y_{1moy} - y_{2moy}) \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \text{ et } b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} (y_{i1} - y_{1moy})^2 + \sum_{j=1}^{n_2} (y_{j1} - y_{2moy})^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Où y_{1moy} et y_{2moy} : respectivement valeurs moyennes de la première et deuxième sous séries respectivement.

A l'aide des tables donnant le pourcentage ponctuel de la distribution de **Student**, nous déterminons la valeur $t_{p,m}$ pour un seuil de signification de $p = I \%$ et un nombre de degrés de liberté $m = n_1 + n_2 - 2$ où n_1 et n_2 respectivement le nombre d'observations de la première et la deuxième sous série.

- Si $|t| \geq t_{p,m}$ alors les valeurs extrêmes sont admises comme faisant partie intégrale de la série mère ;

- Par contre si $|t| < t_{p,m}$ alors les valeurs suspectes sont exclues.

II.4 Reconstitution des données manquantes

Dans les matrices statistiques on constate parfois pour des raisons diverses (mauvais fonctionnement d'un appareil de mesure, exclusion d'observations anormales,...) des omissions d'éléments isolés. L'élimination pure et simple de la ligne incomplète nous priverait d'une information qui peut être précieuse, surtout si les échantillons de données sont de moyenne ou de petite taille. Il est parfois nécessaire de reconstituer ces données manquantes. Le critère de qualité de reconstitution dépend de la finalité de l'étude. La méthode la plus simple consiste à remplacer les observations manquantes de la variable x_i par la moyenne calculée sur toutes les autres observations.

Une méthode considérée comme plus précise, dite méthode non-paramétrique d'estimation des données manquantes peut également être mise à contribution. Cette méthode est basée sur le principe que si deux unités (colonne ou ligne d'une matrice) sont proches dans

Chapitre II: *Recueil et analyse préliminaire de données expérimentales*

l'espace des variables mesurées, elles seront proches et dans l'espace variables non mesurées. Supposons qu'il soit nécessaire d'estimer la valeur manquante x_j de l'unité X_i , c'est à dire d'estimer l'élément x_{ij} de la matrice \mathbf{X} . On considère la sous-matrice $\mathbf{X}^{(j)}$ de \mathbf{X} des colonnes dont sont mesurées les variables x_j . A l'intérieur de $\mathbf{X}^{(j)}$ on envisage le groupe homogène des lignes de matrice les plus proches de X_i dans l'espace des variables mesurées. On remplace ensuite la valeur manquante de x_{ij} par la moyenne des x_{ij} calculée sur le groupe homogène d'unités.

CHAPITRE III:

Application au tronçon Haoued Elhamra

III.1 Détection des fuites

Les fuites mineures ou les émissions fugitives sur les gazoducs peuvent rapidement se transformer en problèmes majeurs (Figure III.). La société SONATRACH utilise une variété de méthodes pour traquer les fuites. Les principales méthodes utilisées impliquent littéralement l'écoute de la terre en utilisant les dernières techniques avancées de la technologie d'écoute, telles que des sondes géothermiques. Le principe d'utilisation de la thermographie pour la détection des fuites est le suivant : gaz s'échappant d'une conduite souterraine modifie les caractéristiques thermiques du sol environnant. Les anomalies thermiques produites au-dessus de la conduite sont décelées par des caméras infrarouges portatives ou embarquées dans un véhicule.



Figure III.1: Dégâts causés par les fuites des hydrocarbures des pipelines.

III.1.1 Méthodes de détection des défaillances CND

Les contrôles non destructifs ou CND permettent de rechercher des défauts dans les canalisations sans les dégrader en utilisant diverses méthodes allant de l'inspection visuelle aux méthodes les plus sophistiquées. Le tableau 11 illustre les différentes méthodes de contrôle non destructif [1].

III.1.1.1 Détection des défauts par ultrasons de la ligne GZ1

En septembre 2004 le tronçon de gazoduc X-60, reliant la station de compression SC2 Oued M'Seka (W.Laghouat) à SC3 Medarreg (W.Tiaret), avait fait l'objet d'une inspection de Contrôle de pertes en métal, Cette inspection, confiée à la PII (Canada) Ltd [18] a été faite au moyen d'un outil d'inspection interne (MagneScan HR) (Figure III.) permettant un sondage ultrasonique de l'épaisseur des parois.



Figure III.2: L'outil intelligent MagneScan HR

Les outils de MagneScan offrent une inspection de haute résolution, fournissant les données détaillées pour un programme de gestion d'intégrité. Ils peuvent être employés pour l'inspection des canalisations véhiculant des fluides gaz ou liquide, sur terre ou sous-marin et de diamètre variant de 6 à 56 pouces (15 à 142 centimètres).

Ces outils permettent de détecter les anomalies suivantes sur les canalisations :

- Piqûre interne et externe de corrosion
- Corrosion générale sur le corps de pipe
- Perte en métal à proximité des soudures
- La perte en métal sous des enveloppes

Ces outils sont conçus principalement pour localiser et dimensionner une perte de métal supérieure ou égale à 10 % de l'épaisseur de la conduite.

Cet outil d'inspection mesure l'épaisseur de la paroi de la conduite à l'aide d'une technique utilisant le temps de réflexion d'ultrasons. Le mesurage faisant appel à cette technique se base sur l'intervalle entre la réflexion des ultrasons renvoyés par la surface de la

paroi interne de la conduite (écho d'entrée) et celle de l'écho renvoyé par la surface de la paroi externe (écho de paroi externe).

L'outil d'inspection interne de mesurage ultrasonique est programmé avant chaque inspection, de façon que seules les impulsions correspondant à un intervalle de temps spécifié soient mesurées et enregistrées afin d'éviter les impulsions mineures qui peuvent dévier les interprétations des résultats.

III.2 Analyse des données par outil intelligent (pétrole brut de Haoud el Hamra)

On a pu obtenir un fichier Excel représentant les données mesurées par l'outil intelligent.

Ces données peuvent être divisées en deux types de variables :

a- Variable qualitative : type de corrosion avec deux modalités : interne ou externe

b- Variables quantitatives :

- Longueur total du tube
- Distance
- Epaisseur, longueur et profondeur de la corrosion
- Orientation

Une analyse préliminaire a été effectuée sur ces données pour pouvoir les analyser en utilisant le Solver Excel et le logiciel Statistica. Cette analyse a permis de corriger certaines données.

III.2.1 Analyse monovariée des données de l'outil intelligent

III.2.1.1 Analyse en fréquence de la variable qualitative type de corrosion

Les résultats de l'analyse en fréquence de la variable « type de corrosion » sont représentés sur le tableau III.1 et sur la figure III.3.

Tableau III.1: Résultats de l'analyse en fréquence de variable type de corrosion.

TYPE	Nombre	%
Extérieur	749	80,89
Intérieur	177	19,11
Total	926	100,00

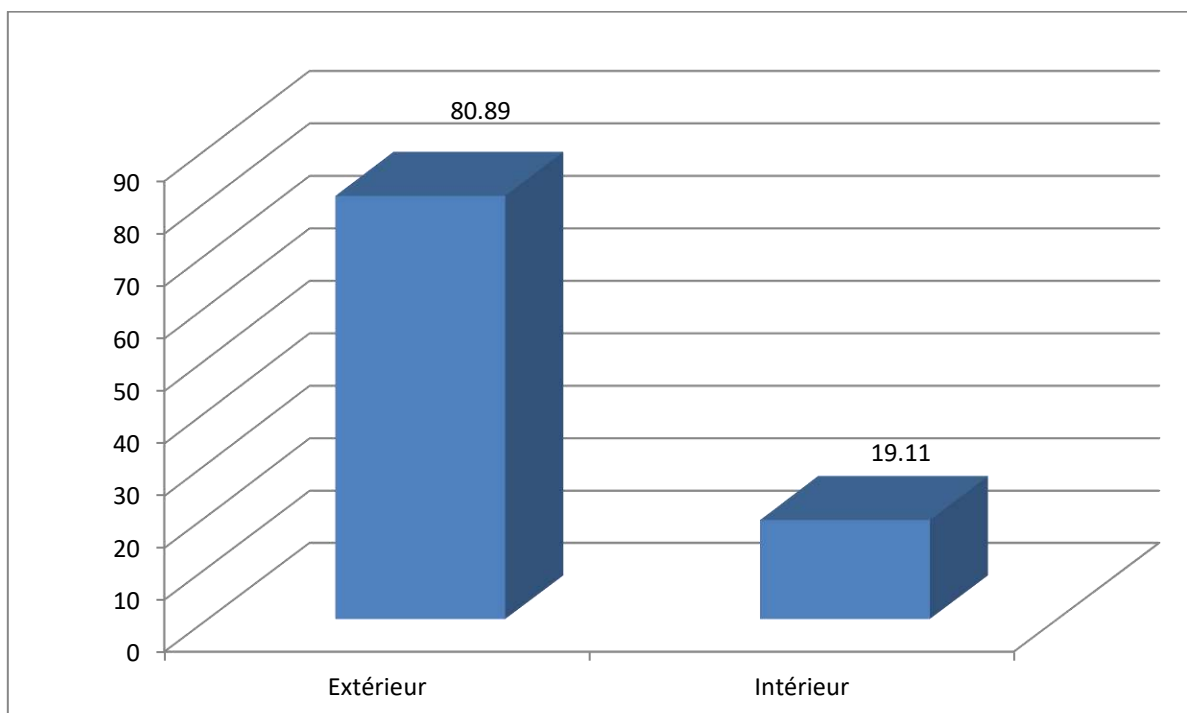


Figure III.3: Histogramme représente les types de corrosion

On remarque que la partie la plus touchée par la corrosion est externe soit 80,89%.

III.2.1.2 Analyse en fréquence des variables quantitatives

Selon les recommandations des experts une discrétisation des données a été effectuée pour les paramètres suivants :

- Epaisseur, longueur et profondeur de la corrosion
- Orientation de la corrosion en degré et en longueur

Chapitre III: Application au tronçon Haoued Elhamra

Variable orientation angulaire : deux cas ont été considérés

1^{er} cas :Orientation en degré :

Les résultats de calcul sur Excel des statistiques descriptives de cette variable quantitative sont donnés dans le tableau III.2.

Tableau III.2: Résultats de calcul sur Excel des statistiques descriptives de variable quantitative.

moyenne	[164,460]
Ecart type	[62,625]
minimum	[28,000]
maximum	[356,000]
médiane	[167,000]

Une discrétisation de cette variable en 4 modalités a donné le tableau de fréquence suivant (Tableau III.3) et un diagramme en bâtons (figure III.4).

Tableau III.3: Fréquence de variable orientation en degré.

ORIENTATION	DOMAINE	NOMBRE	%
ORIENT1	[0,90]	106	11.45
ORIENT2	[90,180]	540	58.31
ORIENT3	[180,270]	205	22.14
ORIENT4	[270,360]	75	8.21
Totale		926	100

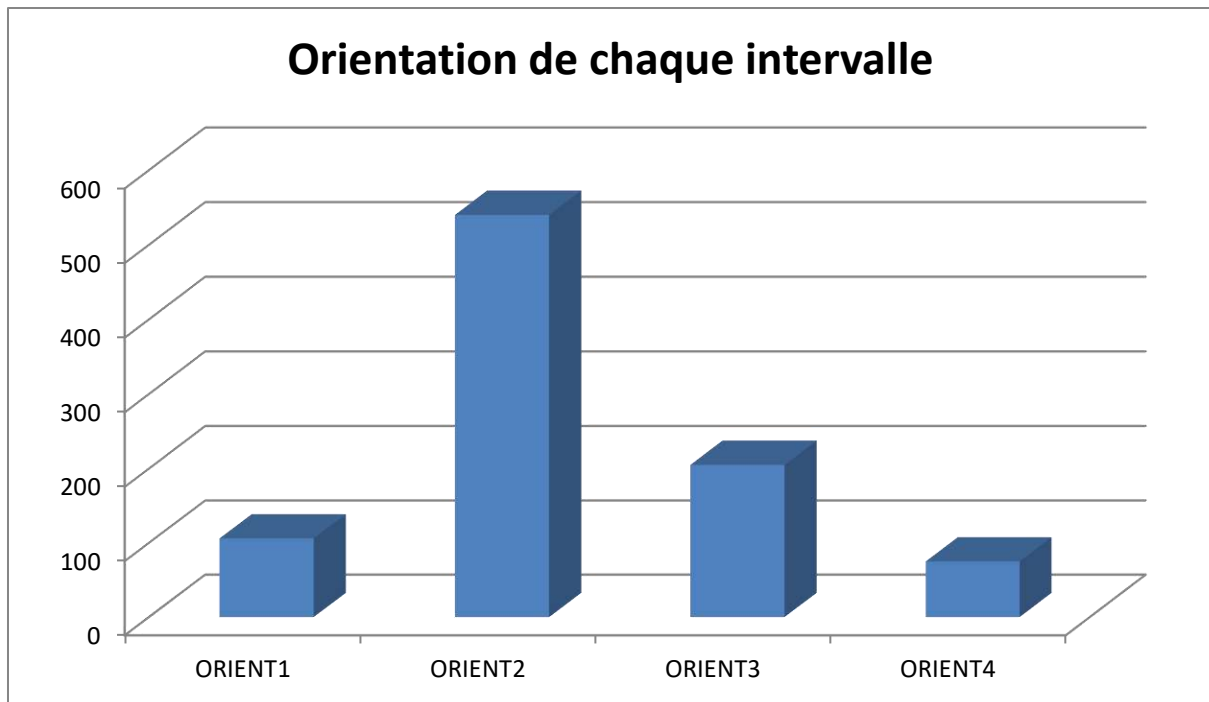


Figure III.4: Histogramme représente orientation de chaque intervalle.

2^{eme} cas :Orientation en longueur

Les données recueillis par l’outil intelligent en degré ont été convertis en mm par la relation suivante :

$$360 = \pi * D$$

Où D est le diamètre de la conduite.

La discrétisation en 5 modalités est donnée dans le tableau III .4 ci dessous

Tableau III.4: Discrétisation d’orientation en longueur.

ORIENTATION 1(MM)	[0,500]
ORIENTATION 2(MM)	[500,1000]
ORIENTATION 3(MM)	[1000,1500]
ORIENTATION 4(MM)	[1500,2000]
ORIENTATION 5(MM)	[2000,2500]

Chapitre III: Application au tronçon Haoued Elhamra

a- Variable profondeur de la corrosion

Les statistiques descriptives pour la variable « profondeur de la corrosion » sont données dans le tableau III.5 suivant

Tableau III.5: Statistiques descriptives pour la variable profondeur.

moyenne	2,463
Ecart type	0,796
minimum	1,400
maximum	4,800
médiane	2,200

En discrétisant cette variable continue selon 5 modalités on obtient le tableau de fréquence III.6).

Tableau III.6: Discrétisation de variable profondeur.

PROFONDEUR	modalités	NOMBRE	%
P1	[0,1]	0	0
P2	[1,2]	259	27.97
P3	[2,3]	442	47.73
P4	[3,4]	149	16.09
P5	[4,5]	76	8.20
Totale		926	100

b- Variable longueur de la corrosion

Les résultats de calcul sur Excel des statistiques descriptives de la variable quantitative « longueur de corrosion » sont donnés dans le tableau III.7.

Tableau III.7: Résultats de calcul sur Exel de variable quantitative "longueur".

moyenne	1 099,075
Ecart type	710,987
minimum	125,000
maximum	11 998,000
médiane	1 018,500

NB : les valeurs sont données en (mm)

Le tableau de fréquence « longueur de corrosion » est présentée dans le tableau III.8.

Tableau III.8: Fréquence de variable longueur de la corrosion.

longueur	Intervalle	Nombre	%
L1	[0,1000]	447	48.27
L2	[1000,2000]	455	49.14
L3	[2000,3000]	7	0.75
L4	[3000,4000]	14	1.51
L5	[4000,5000]	1	0.11
L6	[5000,6000]	0	0
L7	[6000,7000]	1	0.11
L8	[7000,8000]	0	0
L9	[8000,9000]	0	0
L10	[9000,10000]	0	0
L11	[10000,11000]	0	0
L12	[11000,12000]	1	0.11
Totale		926	100

c- Variable largeur de la corrosion

Les résultats de calcul sur Excel des statistiques descriptives de la variable quantitative « largeur de corrosion », son tableau de fréquence et sa représentation graphique sont donnés dans le tableau N°III.9 et N°III.10 et sur la figure III.5.

Tableau III.9: Résultats de calcul sur Excel des statistiques descriptives de variable quantitative "longueur de corrosion".

moyenne	[413,121]
Ecart type	[311,065]
minium	[24,000]
maximum	[2 067,000]
médiane	[340,000]

Tableau III.10: Discrétisation de variable longueur.

LARGEUR	DOMAINE	NOMBRE
11	[0,500]	662
12	[500,1000]	214
13	[1000,1500]	39
14	[1500,2000]	9
15	[2000,2500]	2

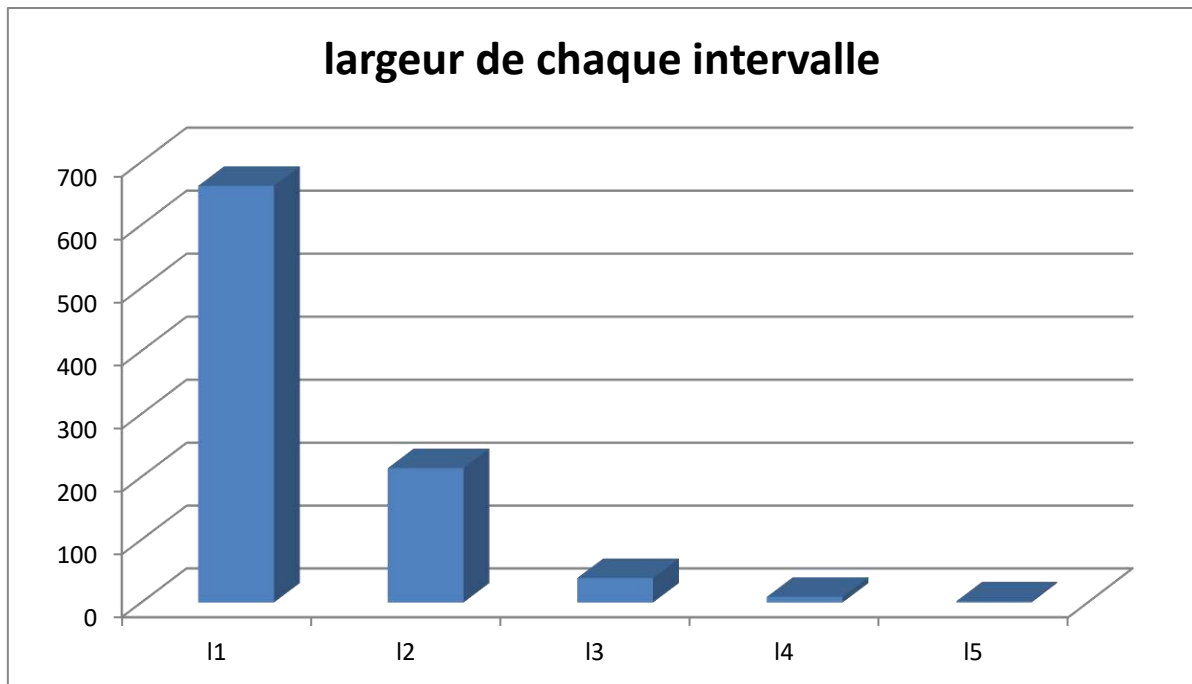


Figure III.5: Histogramme de la largeur de chaque intervalle

III.2.2 Analyse multivariée des données de l'outil intelligent

III.2.2.1 Relation « orientation » et « type de corrosion »

L'utilisation du logiciel Statistica a donné les résultats suivants (tableau III. 11) et diagramme en bâtons (figure III.6).

Tableau III.11: Tableau croisé de l'orientation et les types de corrosion.

	Orientation 1	Orientation 2	Orientation 3	Orientation 4	Total
externe	106	416	152	75	749
interne	0	122	55	0	177
Total	106	538	207	75	926

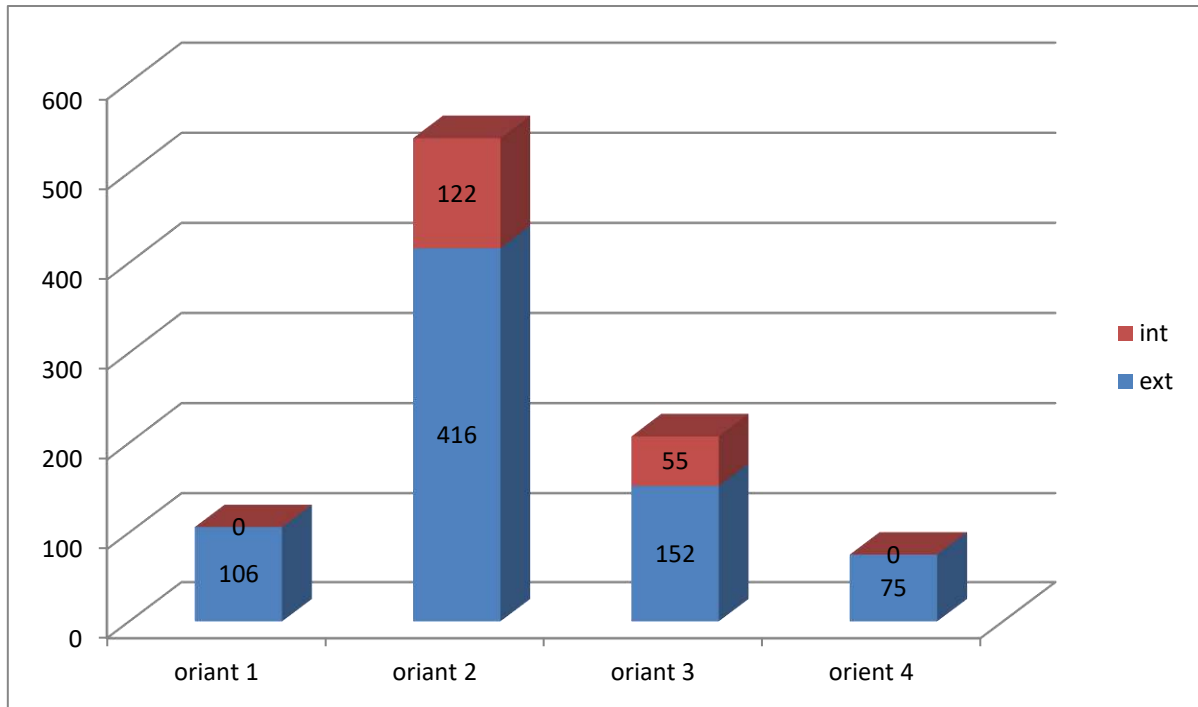


Figure III.6 : Histogramme représente la variation de l'orientation en fonction de type de la corrosion

Interprétation :

L'histogramme représente deux modalités externes et interne en fonction des orientations qui sont des paramètres données par l'outil intelligent.

Dans l'intervalle de 0 à 90 et 270 à 360 on remarque que la corrosion externe existe.

Dans l'intervalle de 90 à 180 et 180 à 270 dans cette partie de la ligne les deux types de corrosion existent en pourcentage proportionnellement inverse.

Dans le cas de l'orientation en longueur on obtient les résultats représentés sur le tableau III.12 et la figure III.7.

Chapitre III: Application au tronçon Haoued Elhamra

Tableau III.12: Discrétisation des deux variables quantitative qualitative.

	EXT	INT	TOTAL
ORIENT1	91	0	91
ORIENT2	392	36	428
ORIENT3	171	141	312
ORIENT4	92	0	92
ORIENT5	3	0	3
TOTAL	749	177	926

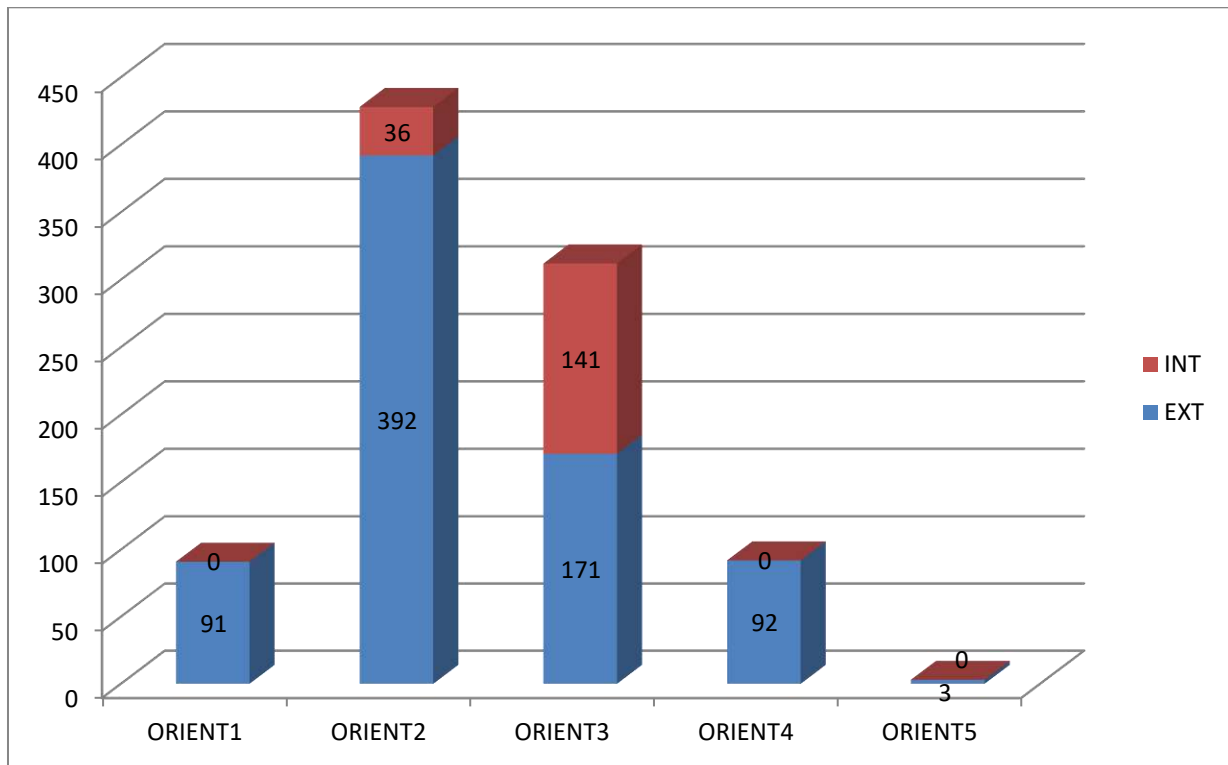


Figure III.7: Histogramme représente le type de la corrosion en fonction de l'orientation en longueur.

Interprétation :

De 0 à 500 : on remarque que la corrosion interne est nulle.

De 500 à 1000 : on remarque que l'existence de la corrosion externe est dominante que la corrosion interne.

De 1000 à 1500 : les deux types de corrosion sont de pourcentage rapproché.

De 1500 à 2000 : la corrosion de type externe est supérieure.

De 2000 à 2500 : les deux types de corrosion tendent vers le zéro.

III.2.2.2 Relation Résultats de l'épaisseur mesurée et reste du métal outil intelligent

Selon les recommandations de l'expert en maintenance des pipelines une analyse bivariée a été effectuée entre la variable type de corrosion et la variable épaisseur du tube.

L'outil intelligent donne l'épaisseur mesurée et l'épaisseur restante. On obtient « épaisseur de perte de métal » par une simple soustraction de l'épaisseur initiale et celle mesurée.

Les résultats de l'analyse sont donnés dans le tableau III. 13 et représentés graphiquement sur la figure III.9.

Tableau III.13: Résultats de l'analyse des données de tronçon.

	pas de réparation	Nécessite d'une réparation
interne	153	24
externe	539	210
Total	692	234

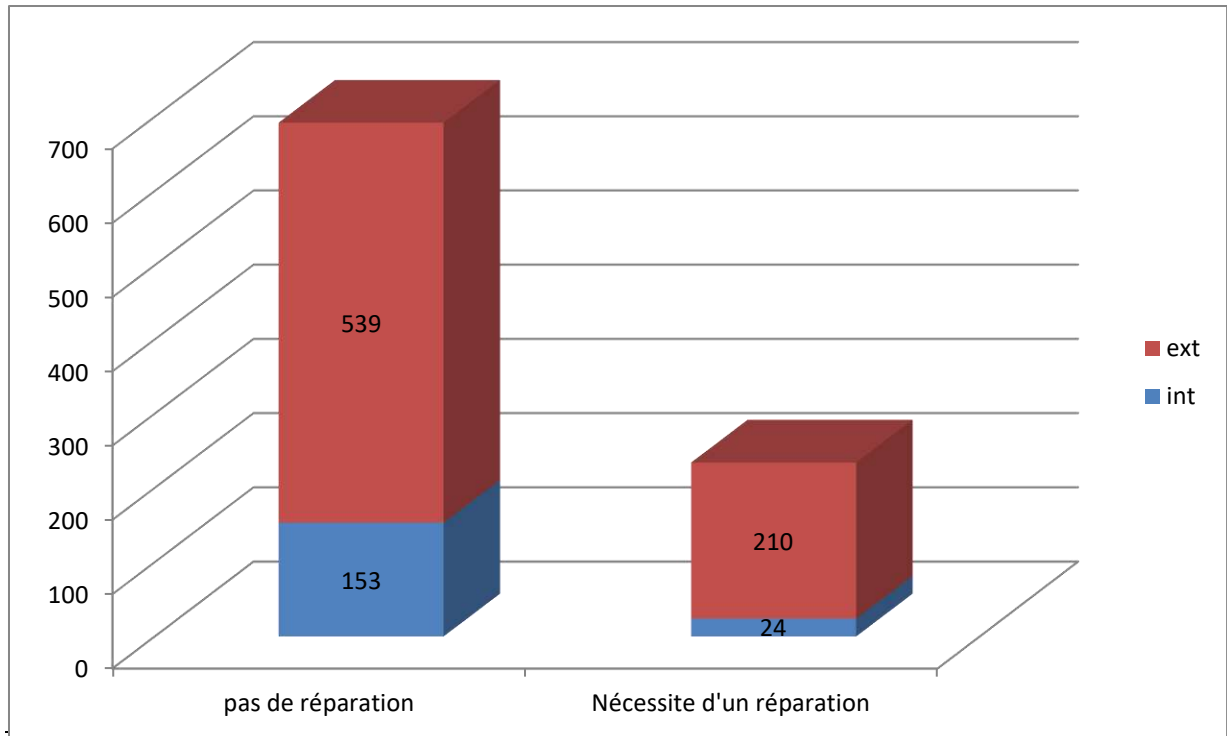


Figure III.8: Histogramme représente les résultats d'analyse.

Interprétation :

Selon les modalités suivant on peut déterminer le métal a réparé :

Pourcentage < 35 : pas de réparation

$35 \leq \text{pourcentage} \leq 55$: nécessite une réparation

Pourcentage > 55 nécessite une réparation :

Externe : réparation par méthode de MICOKI

Interne : réparation par méthode CLOCK SPRING

III.2.2.3 Caractéristiques du défaut(CPR) par l'outil

Ils excitent caractéristiques de défaut:

- $CPR < 1$: Réparation rapide.
- $CPR > 1$: nécessite une analyse de défaut

Cette dernière révèle les types de corrosions suivantes :

Chapitre III: Application au tronçon Haoued Elhamra

- Corrosion par piqure
- Feuilletage
- Défaut de fabrication
- Défaut du coulis

Les résultats de l'analyse sont présentés sur le tableau III.14.

Tableau III.14: Résultats de l'analyse de résultat de tronçon.

Type	Caractéristiques de défaut
extérieur	1,79
extérieur	1,79
extérieur	1,75
extérieur	1,75
intérieur	2,13
intérieur	1,79
intérieur	1,71
intérieur	1,66

Remarque :

On constate que toutes les caractéristiques de défaut sont supérieures à 1, donc elles nécessitent une analyse de défaut.

III.3 Conclusion

D'après les analyses effectuées, on constate que :

- Il existe plusieurs intervalles endommagés par la corrosion au niveau de la ligne de Haoud el Hamra.
- La corrosion de type extérieure est plus dominante en comparaison avec la corrosion intérieure.
- Les caractéristiques de défaut énoncent que la partie nécessite une analyse plus profonde pour déterminer le type de corrosion et sa méthode de réparation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La corrosion dans les canalisations de transport des hydrocarbures est un problème d'actualité vue les conséquences économiques et environnementales que peut causer une cassure d'un gazoduc ou d'un oléoduc. Pour réduire ce problème, les chercheurs ont trouvé un ensemble de méthodes permettant de détecter précocement la corrosion. Parmi les méthodes de détection, on envoie dans la canalisation un outil intelligent qui permet de recueillir les données et informations nécessaires qui permettent de connaître l'état interne et externe du tube.

Plusieurs paramètres ont été collectés par cet outil pour le tronçon « puits- Haoued Elhamra. Les variables ont été divisés en variables qualitatives et quantitatives. Après discrétisation des variables quantitatives sur recommandations d'un expert et détermination des tableaux de fréquence et de polygone de fréquence. Pour les paramètres principaux de la corrosion, la corrosion externe est majoritaire avec 81%.

Selon les études que nous avons faites sur la corrosion des pipelines du centre du Haoued Hamra, il y a une partie des pipelines estimée à environ 69% qui ne vaut pas la peine d'être réparée et le pourcentage restant mérite d'être réparé, et cela dans les deux types de corrosion des pipelines internes et externes.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Ministère de l'Énergie Algérie <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=609>.
visite :16/08/19.
2. Kishawy H.A., Gabbar H.A., (2010), *Review of pipeline integrity management practices*.Int. J. Press. Vessels Pip., 87, 373–380.
3. A. Fossati, F. Borgioli, E. Galvanetto, T. Bacci, *Corrosion Science* 48 (2006) 1513–1527.
4. SAHRAOUI Yacine,(2014) *optimisation des methodes d'inspection des pipes,these de Doctorat*.
5. Koch G.H., Brongers M.P.H., Thompson N.G., Virmani Y.P., Payer J.H., (March 2002),.
6. Leclerc.E, Goldestein.H. *L'agressivité du sol et les conduites enterrées- Guides des techniques de mesures en protection cathodique CEOCOR 1976 ; 386*.
7. AMARA ZENATI Abdeldjelil,2014, *iÉtude du comportement des aciers API 5L X60 sollicités par contraintes mécaniques et milieu de sol Algérien Simulé,these de doctorat*.
8. Mehanna.M. *Mécanismes de transfert direct en corrosion microbienne des aciers. Thèse de Doctorat Insitut National Polytechnique de Toulouse France,2009*.
9. Antoine. P, Luiz Edmundo.A., Anne-Marie.C *Local corrosion processes in the presence of sulphate-reducing bacteria: Measurements under biofilms. Corrosion Science 1993 ;35 : 693–698*.
10. Bahije.L, Benyahia.H, Hamzaoui.S Bengueddour.R, Rerhrhaye.W, Abdallaoui.F, Zaoui.F . *Comportement du NiTi en présence des bactéries orales : corrosion par le Streptococcus mutans. International orthodontics. 2011; 9 :110-119*.
11. Hannani A, 2002. *Corrosion & Protection des ouvrages métallique. Journée d'étude organisée par CHYPCS, 4 rue Mahiedine Maalah, Panorama Hussein Dey, Alger*.
12. Ibrahim I, 2008. *La corrosion induite par courant alternatif sur les canalisations enterrées sous protection cathodique. Thèse de Doctorat : Génie des procédés et haute technologie. Université Pierre et Marie Curie, 209p*.
13. Michelle NEUILLY : *Modélisation et estimation des erreurs*.
14. <http://www.educnet.education.fr/rnchimie/math/benichou/tests/dixon/>
15. "Practical Guide to Chemometrics" Stephen John Haswell ed: Marcel Dekker, Inc New York

16. *"Multivariate Statistical Methods" A. Primer, Bryan F.J. Manly ed: Chapman & Hall London*
17. *"Multivariate Calibration" Harald Martens, Tormod Naes ed: John Wiley & sons Chichester*
18. *Group limited Canada'' -PII. Rapport d'inspection en ligne et diagnostic. Direction de traitement de canalisation (DRC) SONATRACH. ARZEW.*