

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE APPLIQUÉES

PAR
PHILIPPE NAUD

ANALYSE D'IMAGES RAYON-X APPLIQUÉE À L'OPTIMISATION DE LA
 DÉTECTION DE LA CORROSION DANS LES CANALISATIONS
 MÉTALLIQUES

AOÛT 2006

SOMMAIRE

L'inspection des réseaux de canalisation métalliques industriels représente une économie de plusieurs millions de dollars investis annuellement. Ces inspections assurent une production ininterrompue des entreprises et un respect des différentes normes de sécurité qui régissent ces installations. Une bonne part de ces inspections préventives est faite à l'aide de clichés radiographiques réalisés sur différentes sections de conduites. Ces clichés sont ensuite interprétés et analysés visuellement par des techniciens expérimentés.

Dans ce mémoire, nous proposons une nouvelle application de la vision artificielle développée pour la mesure de l'épaisseur résiduelle des parois de conduites corrodées inspectées par radiographie orthogonale. L'objectif principal de ce travail est d'optimiser la collecte de données et l'interprétation d'images radiographiques en utilisant un système d'analyse d'images automatisé. Nous démontrons dans ce mémoire que l'outil d'analyse créé peut à ce jour repérer avec précision les frontières internes et externes des conduites cylindriques droites altérées par un phénomène de corrosion. Il peut aussi repérer les zones de piqûration présentes sur les conduites et réaliser des mesures précises de l'épaisseur résiduelle des parois. Nous présentons à la fin de ce document quelques résultats obtenus par l'analyse de divers échantillons par notre système et comparons ceux-ci avec les résultats obtenus par des techniciens expérimentés pour les mêmes analyses.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Alain Chalifour, et mon codirecteur, Yves Dubé, pour leur implication, leur disponibilité, leurs précieux conseils et leurs mots d'encouragement qui ont été des facteurs déterminants dans ma réussite.

Merci aussi au fond NATEQ ainsi qu'à la compagnie X-Per-X inc. de Montréal pour leur soutien financier et technique ayant rendu possible ce projet et permis de le mener à bien.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans souligner le soutien que m'a apporté chacun des membres de ma famille tout au long de mes études et aussi tout le soutien qu'a su me donner ma conjointe Émilie pour me permettre de persévérer et de surmonter les différents obstacles rencontrés sur le chemin de la réussite.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	I
REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES FIGURES	VI
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. LA RADIOGRAPHIE ORTHOGONALE ET LA DÉTECTION DE LA DÉGRADATION.....	3
1.1 INTRODUCTION.....	3
1.2 NOTIONS DE BASE EN RADIOGRAPHIE	3
1.2.1 Les rayons X.....	4
1.2.2 Les rayons Gamma.....	6
1.2.3 L'absorption du rayonnement ionisant	7
1.2.4 La détection du rayonnement ionisant	10
1.3 LE CAS PARTICULIER DE LA RADIOGRAPHIE DES TUBES	13
1.3.1 Description de la géométrie des conduites	14
1.3.2 Projections radiographiques de tubes.	15
1.3.3 Facteurs influençant la qualité des projections orthogonales.....	20
1.3.4 Profil d'épaisseur et absorption du rayonnement dans les tubes.....	26
1.3.5 Impression sur film radiographique des tubes : description des images.....	28
1.4 USURE ET CORROSION	30
CHAPITRE 2. ANALYSE DES IMAGES RADIOGRAPHIQUES ; RÉTROSPECTIVE	36
2.1 INTRODUCTION.....	36
2.2 LES MÉTHODES.....	36
2.2.1 Méthodes manuelles	36
2.2.2 Méthodes automatisées	37
2.2.3 Méthodes hybrides	38
2.3 MESURES DES ÉPAISSEURS DES PAROIS	38
2.3.1 Mesures d'épaisseur par densité.....	38
2.3.2 Mesures d'épaisseur par coupe.....	41

CHAPITRE 3. ALGORITHMES DE DÉTECTION DES CONTOURS.....	44
3.1 CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES NUMÉRISÉES	44
3.2 FILTRAGE DES IMAGES NUMÉRISÉES.....	46
3.3 SEGMENTATION DES IMAGES : ÉLIMINATION DU FOND DE L'IMAGE	47
3.4 DÉTECTION DES PAROIS.....	53
3.5 DÉTECTION DES Puits DE CORROSION SUR LES PAROIS	59
3.6 ESTIMATION DE L'ÉPAISSEUR DES PAROIS	63
CHAPITRE 4. TESTS ET ANALYSE DES RÉSULTATS	66
4.1 DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNÉES	66
4.2 DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI	70
4.3 DESCRIPTION DES PARAMÈTRES RADIOGRAPHIQUES	71
4.4 VALIDATION DES RÉSULTATS	72
4.4.1 <i>Détection des contours</i>	72
4.4.2 <i>Détection des piqûres</i>	75
4.4.3 <i>Mesures d'épaisseur</i>	77
CHAPITRE 5. DISCUSSION ET CONCLUSION.....	80
5.1 ANALYSE DES RÉSULTATS	80
5.2 DISCUSSION SUR L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	83
5.3 AMÉLIORATIONS ET TRAVAUX FUTURS	84
5.4 CONCLUSION	86
ANNEXE A.....	87
RÉFÉRENCES.....	100

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I Coefficients d'absorption	9
Tableau II Comparaison entre les mesures d'épaisseur de différents échantillons.....	78
Tableau III Échantillon B1	87
Tableau IV Échantillon B2	88
Tableau V Échantillon B3	89
Tableau VI Échantillon S1	90
Tableau VII Échantillon SP1	91
Tableau VIII Échantillon SP5	92
Tableau IX Échantillon B7	93
Tableau X Échantillon A.....	94
Tableau XI Échantillon B	95
Tableau XII Échantillon T1	98
Tableau XIII Échantillon T2	99

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 : Schéma d'une ampoule émettrice d'un tube à rayons X.....	4
Figure 1.2 : Atténuation du rayonnement.	10
Figure 1.3 : Courbes sensitométriques.	12
Figure 1.4 : Bloc étalon en escalier.	13
Figure 1.5 : Projection radiographique d'un bloc étalon.	13
Figure 1.6 : Conduites rectilignes : diamètre et épaisseur.....	15
Figure 1.7 : Méthode d'exposition panoramique.	16
Figure 1.8 : Le Tecnitest Sistema C-0618/G et le GammaMat M-6	17
Figure 1.9 : Montage pour une projection tangentielle.....	19
Figure 1.10 : Montage pour une projection orthogonale	19
Figure 1.11 : Schéma du montage d'une projection tangentielle.	20
Figure 1.12 : Schéma du montage d'une projection tangentielle vue en tranche.	20
Figure 1.13 : Flou géométrique en fonction de la taille de la source.	22
Figure 1.14 : Schéma en coupe du cône de projection.	23
Figure 1.15 : Déplacement transversal de la source radioactive.	25
Figure 1.16 : Décentrage longitudinal de la source émettrice.	25
Figure 1.17 : Schéma de projection orthogonale d'une conduite tubulaire.....	26
Figure 1.18 : Parcours du rayonnement traversant une conduite tubulaire.	27
Figure 1.19 : Épaisseur de matériau traversé en fonction de la position le long d'un profil transversal.	27
Figure 1.20 : Niveaux de gris (B) du profil (A)	28
Figure 1.21 : Résultat d'une projection tangentielle par rayonnement gamma.....	29
Figure 1.22 : Conduite d'acier de 11,43 cm de diamètre externe présentant une forte corrosion externe.	32
Figure 1.23 : Conduite d'acier de 11.43 cm de diamètre externe présentant une forte corrosion interne.	32
Figure 1.24 : Les huit types de corrosion selon Fontana.	35
Figure 2.1 : Bloc étalon en escalier (step wedge).	40
Figure 2.2 : Projection d'un bloc en escalier.	40
Figure 2.3 : Représentation des niveaux de gris sur deux profils	41
Figure 2.4 : Niveaux de gris (B) du profil (A)	42
Figure 2.5 : Épaisseurs de matériau traversé en fonction de la position le long d'un profil.....	43
Figure 3.1 : Distribution des niveaux de gris sur une coupe transversale.	48
Figure 3.2 : Histogramme des niveaux de gris d'une coupe transversale	50
Figure 3.3 : Histogramme des niveaux de gris des pixels du fond dans une coupe transversale	51

<i>Figure 3.4 : Profil des niveaux de gris d'une coupe excluant le fond</i>	<i>51</i>
<i>Figure 3.5 : Histogramme des niveaux de gris d'une coupe excluant le fond.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 3.6 : Image originale d'une projection de conduite droite ayant subi une opération d'amélioration de contraste.</i>	<i>52</i>
<i>Figure 3.7 : Histogramme des niveaux de gris de l'image présentée à la figure 3.6</i>	<i>53</i>
<i>Figure 3.8 : Affichage de la forme binarisée de l'image présentée à la figure 3.6</i>	<i>53</i>
<i>Figure 3.9 : Opérateurs de Sobel de dimension 3x3.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 3.10 : Présentation d'une tranche longitudinale (A) de la conduite.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 3.11 : Niveau de gris d'une tranche longitudinale et son modèle de régression sur une paroi non altérée</i>	<i>61</i>
<i>Figure 3.12 : Niveau de gris d'une tranche longitudinale et son modèle de régression provenant de la tranche 'A' de la figure 3.13.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 3.13 : Tranche longitudinale (A) qui provient d'une paroi présentant des simulations de piqûres de corrosion</i>	<i>62</i>
<i>Figure 3.14 : Schéma de la mesure d'épaisseur pour une coupe i d'une paroi de conduite ne présentant aucune piqûre de corrosion.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 3.15 : Schéma de mesure d'épaisseur pour une coupe i d'une paroi de conduite présentant deux piqûres de corrosion.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 4.1 : Radiographie d'une conduite avec deux sillons circonférentiels externes. .</i>	<i>67</i>
<i>Figure 4.2 : Radiographie d'une conduite présentant une soudure circonférentielle....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 4.3 : Section de conduite présentant des perforations à fond conique sur la surface interne.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 4.4 : Section de conduite présentant des perforations à fond conique sur la surface externe</i>	<i>68</i>
<i>Figure 4.5 : Description du montage utilisé pour l'acquisition des clichés radiographiques de conduites cylindriques</i>	<i>70</i>
<i>Figure 4.6 : Validation de la détection de la paroi externe pour une conduite avec un sillon externe. Les pixels rouges représentent la frontière externe de la conduite détectée par notre système</i>	<i>73</i>
<i>Figure 4.7 : Validation de la détection des frontières interne et externe pour une paroi de conduite avec une soudure</i>	<i>73</i>
<i>Figure 4.8 : Localisation erronée de la position de la frontière interne d'une paroi sur un profil de conduite</i>	<i>74</i>
<i>Figure 4.9 : Échantillon 'B' qui contient des perforations internes et externes visibles sur le fond de la conduite mais aussi sur la paroi supérieure</i>	<i>75</i>
<i>Figure 4.10 : Schéma de détection des piqûres de corrosion présentes sur une paroi de conduite.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure 5.1 : Section de paroi surexposée.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 5.2 : Profil des niveaux de gris sur une coupe de paroi</i>	<i>82</i>

INTRODUCTION

Des millions de dollars sont investis chaque année pour l'inspection des réseaux de canalisations industrielles. Ces inspections ont pour but de s'assurer que les installations répondent toujours aux normes de sécurité des entreprises et de planifier efficacement l'entretien préventif des réseaux de canalisation. L'acier est présent dans plus de 90 % des réseaux de canalisations industrielles, ce qui implique que la corrosion est l'un des principaux facteurs de dégradation observés dans le milieu. Pour bien repérer et quantifier la présence de corrosion dans les réseaux de canalisation métallique, l'inspection non destructive par rayons ionisants est utilisée depuis plusieurs années déjà. Cette technique a comme principal avantage de pouvoir être utilisée alors que les réseaux sont en opération et ne nécessite donc aucun arrêt de production dans les entreprises concernées.

Les méthodes d'analyse par rayons ionisants, que ce soit la radiographie ou la gammagraphie, produisent une projection d'une section de conduite sur un film sensible. Plusieurs mesures peuvent par la suite être tirées des images présentes sur ces films. Jusqu'à présent, la majorité des mesures prises sur ces clichés sont obtenues par des techniciens qui repèrent visuellement et mesurent les zones problématiques des images à analyser. Cette façon de faire est très sensible à l'expérience et au savoir-faire des techniciens et les résultats ainsi obtenus varient d'une analyse à l'autre pour une même image. De plus, seulement une fraction des informations présentes sur les images à analyser peut être exploitée dû au temps élevé que nécessite la prise de mesures manuelles sur les clichés.

Le but de ce travail de recherche est de démontrer que grâce à un système de vision artificielle, il est possible d'arriver à exploiter les clichés radiographiques de canalisations tubulaires pour en tirer des informations précises sur la dimension, la position et la morphologie des zones corrodées présentes et permettre de produire un fichier de données utilisable pour le calcul de différentes statistiques. Celles-ci sont effectuées dans le but de déterminer l'état général des systèmes de conduites inspectés. Nous désirons aussi que notre système conserve un niveau de précision similaire à celui atteint par un technicien et qu'il puisse effectuer ses analyses en un temps de traitement inférieur à dix minutes par image.

Pour ce faire, nous présenterons dans le premier chapitre de ce mémoire les fondements des techniques d'analyse par rayonnement ionisant pour permettre au lecteur de se familiariser avec le mode d'acquisition des projections utilisées et pour permettre l'interprétation des différents clichés radiographiques. Dans le deuxième chapitre, nous présenterons des techniques de mesures de paroi proposées par différents auteurs de la littérature scientifique. Le troisième chapitre explique en détails le fonctionnement du système de mesures mis sur pied dans le cadre de ce projet. Nous traitons et discutons dans le quatrième chapitre de différents résultats obtenus par notre système lors de l'analyse de différents échantillons de conduites. Dans le cinquième chapitre, nous discuterons des performances de notre système et nous présenterons différentes améliorations à envisager.

Chapitre 1

La radiographie orthogonale et la détection de la dégradation.

1.1 Introduction

Pour effectuer une étude précise et approfondie des conduites tubulaires, certains principes de base doivent être connus. Dans cette optique, nous présenterons au début de ce chapitre les notions de base des techniques radiographiques. Nous traiterons ensuite du cas particulier des projections de tubes. Nous terminerons ce chapitre en présentant sommairement différents types d'usures et de corrosion s'appliquant aux conduites industrielles.

1.2 Notions de base en radiographie

La projection radiographique de conduites cylindriques comporte plusieurs subtilités que nous expliquerons dans cette section. Nous commencerons par expliquer les techniques permettant l'émission du rayonnement ionisant sous forme de rayons X, puis nous expliquerons l'émission du rayonnement gamma. Nous discuterons ensuite des phénomènes produisant l'atténuation des rayons ionisants. Nous conclurons en présentant les techniques de détection du rayonnement ionisant.

1.2.1 Les rayons X

Les rayons X sont émis à l'aide d'ampoules, contrairement aux rayons gamma qui sont émis à l'aide d'isotopes radioactifs tels que le cobalt 60 ou l'iridium 192. Les ampoules émettrices de rayons X sont constituées d'une anode et d'une cathode. Ces cathodes sont scellées sous vide dans une enceinte généralement faite de verre ou de céramique qui est soumise à une pression d'environ 1×10^{-6} Pa. La cathode est un filament métallique recouvert d'oxyde ayant un fort pouvoir émissif. Cette cathode est chauffée (courant électrique induit) à haute température afin de permettre l'émission d'électrons suite à un effet thermoélectronique entre la cathode et l'anode.

L'anode est généralement faite de tungstène et elle est disposée face à la cathode. Le courant électronique émis à partir de la cathode est accéléré par la différence de potentiel entre l'anode et la cathode. Les électrons frappent l'anode à des vitesses élevées et l'énergie provoquée par les collisions entre les électrons et les atomes de l'anode entraîne l'émission de photons d'énergies variées, que l'on nomme rayons X.

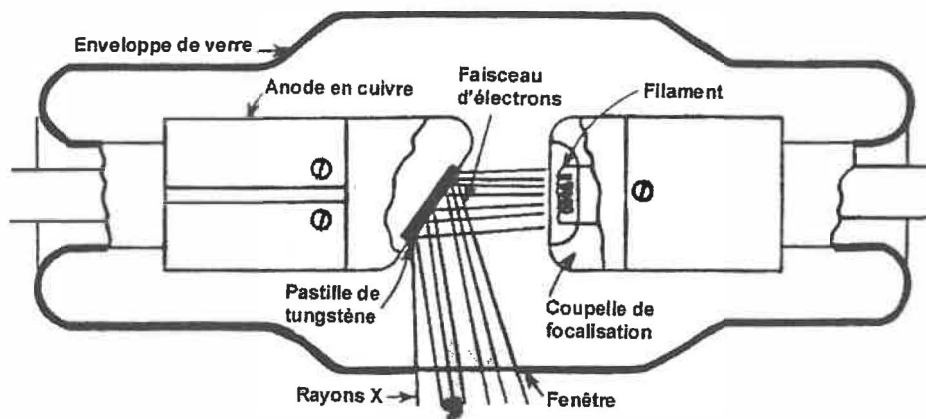


Figure 1.1 : Schéma d'une ampoule émettrice d'un tube à rayons X.

Lors de l'analyse des films radiographiques obtenus par rayons X, la quantité de rayonnements (flux électronique) émis par un tube à rayons X est importante. L'image radiographique résulte de la variation de ce flux en fonction de différentes positions sur le détecteur. Une bonne connaissance de la fonction de variation du flux électronique est importante dans la mise au point d'un modèle de détection des défauts. Dans le cas d'un tube à rayons X, le flux électronique (en unités Gray) dépend des paramètres suivants :

- le débit électronique à la source ;
- la différence de potentiel entre l'anode et la cathode ;
- le temps d'irradiation en secondes ;
- la distance entre le foyer d'émission de la source et le film (ou le détecteur) ;
- la filtration du rayonnement.

Le flux électronique est calculé selon la formule suivante :

$$K = \frac{i t \Gamma_x}{d^2} \quad (1.1)$$

où,

i = débit électronique en mA ;

Γ_x = constante de débit d'ionisation du tube à rayons X ;

t = temps d'irradiation du détecteur en secondes ;

d = distance source-détecteur en mètres ;

K = flux électronique ou kerma en Gray.

La constante de débit d'ionisation Γ_x d'un appareil à rayons X est généralement exprimée en $\text{Gy h}^{-1} \text{ m}^{-1}/\text{mA}$, où Gy représente des unités «*Grays*» (1 Gray = 1 J/s). Cette constante est mesurée expérimentalement par les constructeurs pour chaque valeur de la distance source-détecteur appliquée au tube et les diverses filtrations internes de ce flux. On se référera à l'ouvrage de RUAULT [1] pour plus de détails sur l'utilisation des rayons X en radiologie.

1.2.2 Les rayons Gamma

Les procédés radiographiques peuvent aussi être réalisés à l'aide d'un rayonnement gamma. Par ailleurs, l'émission de rayons gamma nécessite l'utilisation de radioéléments. Les radioéléments sont des atomes qui ont la propriété de changer de nature en fonction du temps par le biais d'une modification de leur structure nucléaire. Il existe des radioéléments naturels provenant des familles de l'uranium, de l'actinium et du thorium. Les rayonnements par radioéléments généralement utilisés dans les essais non destructifs sont obtenus grâce à un processus physique provoqué artificiellement, soit l'irradiation par un flux de neutrons. On trouve des radioéléments naturels sous la forme de minerais. Ces radioéléments se transforment en un isotope stable du plomb dont la masse atomique est de 206 pour les éléments de la famille de l'uranium, de 207 pour ceux de l'actinium et de 208 pour ceux du thorium. Les noyaux radioactifs émettent trois types de rayonnement distincts, soit les rayons α , β et γ . Chacun de ces rayonnements correspond à une transformation particulière du noyau.

Le rayonnement α est émis lorsque le noyau libère de l'énergie lors de la perte de nucléons. Au cours de cette transformation, le noyau du radioélément perd des neutrons et des protons sous la forme de noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$. Bien que certaines émissions du rayonnement α puissent s'effectuer sans émission de photons, on constate généralement une telle émission.

Le rayonnement β survient lors de la transformation d'un nucléon en un autre nucléon. Ce qui se produit principalement lors d'une transition d'un neutron vers une paire formée d'un proton et d'un électron ($n \rightarrow p^+ + e^-$). Suite à cette transition, l'électron est violemment expulsé, produisant une émission de type β^- . Il se peut que ce rayonnement soit aussi accompagné de rayons β^+ . Dans ce cas, il y aura émission d'un positron plutôt que d'un électron. Cette émission survient après la transformation d'un proton en une paire formée d'un proton et d'un positron ($p^+ \rightarrow n + e^+$).

Le rayonnement γ est instantané et il est dû à une réorganisation du noyau atomique suite à l'émission d'un rayonnement α ou β . Le rayonnement gamma, sous la forme d'émission de photons, est créé lors du passage d'un nucléon à un niveau d'énergie inférieur dans son noyau atomique. La quantité d'énergie émise lors de ce passage est fonction des énergies respectives des couches nucléiques de départ et d'arrivée des nucléons. L'intérêt du rayonnement γ est qu'il peut traverser des épaisseurs de matière importantes contrairement aux rayonnements α et β .

1.2.3 L'absorption du rayonnement ionisant

Qu'ils soient de type X, α , β ou γ , les rayonnements ionisants sont soumis à une absorption en traversant la matière. Selon RUAULT [1] « *L'atténuation est le terme général qui doit être utilisé quand on s'intéresse à l'ensemble des divers phénomènes qui se produisent lorsqu'un rayonnement traverse la matière* ». L'absorption des rayons ionisants est une conséquence de leur interaction avec les électrons gravitant autour du noyau des atomes traversés et varie en fonction du nombre atomique de l'élément absorbeur. Elle dépend aussi des caractéristiques du rayonnement que sont sa fréquence, sa longueur d'onde et son énergie.

Toujours selon RUAULT [1], différents mécanismes d'interactions peuvent intervenir dans le phénomène global d'absorption :

- la diffusion électromagnétique ;
- l'effet photoélectrique ;
- la diffusion Compton ;
- l'émission de fluorescence X ;
- l'effet Auger ;
- la création de paires d'électrons ;
- la photodésintégration.

La présence d'un ou de plusieurs de ces mécanismes est déterminée par la différence énergétique entre le rayonnement et un électron rencontré. Il sort du cadre de ce mémoire de présenter en détail chacune de ces interactions. Bien que selon SUNG SIK LEE [2], il soit complexe et voire même impossible d'arriver à simuler précisément l'ensemble de ces interactions entre le rayonnement et la matière dans un environnement non standardisé, LAHURE [3] propose une fonction offrant une approximation de l'atténuation des rayonnements ionisants. Selon cet auteur, cette fonction n'est valide que pour des sources de rayonnement monochromatiques, bien qu'en pratique celle-ci peut être utilisée dans les cas d'un rayonnement X ou d'un rayonnement gamma. La relation proposée est la suivante ;

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.2)$$

où,

I = l'intensité des radiations transmises en Grays ;

I_0 = l'intensité des radiations émises à la source en Grays ;

μ = le coefficient d'absorption linéaire en cm^{-1} ;

x = l'épaisseur du spécimen traversé en cm.

De cette équation, on conclut que pour un objet composé d'une même substance (homogène), l'intensité d'un rayonnement diminuera de façon exponentielle en fonction de l'épaisseur de la matière traversée. En récupérant l'ensemble des intensités émanant d'un objet homogène, on peut identifier les zones de faible absorption. Conséquemment, ces zones peuvent donc être associées à des zones de plus faible épaisseur. Il est à noter que le coefficient d'absorption linéaire utilisé dépend de la substance traversée et de la source de rayonnement utilisée. Ce coefficient est exprimé en cm^{-1} . Le tableau suivant présente différents coefficients d'absorption linéaire couramment utilisés :

Tableau I

Coefficients d'absorption linéaire pour des matériaux usuels.

Table des coefficients d'absorption linéaire pour des matériaux usuels				
	μ (cm^{-1})			
Source de rayonnement X	Aluminium	Plomb	Acier	Béton
100 kVc	0,05	34,5	2,75	0,39
150 kVc	0,04	23,0	2,09	0,30
250 kVc	0,03	8,62	0,70	0,25
400 kVc		3,14	0,80	0,21
500 kVc		1,82	0,17	0,19
1000 kVc		0,85	0,11	0,15
2000 kVc		0,54	0,078	0,11
Source de rayonnement γ				
Co^{60}		0,56	0,31	0,10
Ra^{226}		0,49	0,30	0,09
Cs^{137}		1,10	0,40	0,13
Ir^{192}		1,44	0,58	0,14

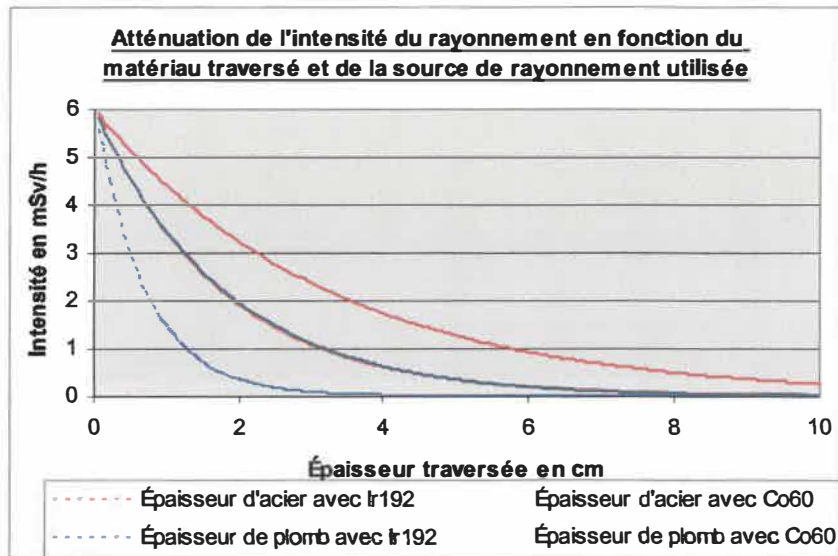


Figure 1.2 : Atténuation du rayonnement.

1.2.4 La détection du rayonnement ionisant

Afin de récupérer l'ensemble du rayonnement émanant d'objets radiographiés, différents types de détecteurs peuvent être utilisés. Le plus souvent, l'industrie utilise des détecteurs sous forme de films ou de capteurs CCD. Les détecteurs CCD ont plusieurs avantages, dont l'élimination des erreurs dues aux étapes de révélation et de la numérisation subséquente dans le processus d'analyse des films. Par contre, les détecteurs CCD ne sont que peu ou pas flexibles. En effet, ces détecteurs ne peuvent être utilisés pour effectuer des projections panoramiques. De plus, ces détecteurs sont relativement dispendieux et nécessitent l'utilisation de matériel informatique pour l'acquisition des données. Bien que l'utilisation des détecteurs CCD aurait pu s'avérer intéressante dans notre projet, les coûts associés au passage du film à cette technologie étaient superflus pour l'entreprise X-Per-X. En effet, le changement de technologie aurait nécessité pour cette entreprise l'acquisition d'un système à détecteur CCD pour chacune de ses équipes d'analyse.

Nous avons donc opté pour l'utilisation des films sensibles. L'analyse informatique des films sensibles peut s'effectuer en un point de service centralisé, ce qui ne nécessite que l'investissement associé à l'achat, ou à la location, d'un numériseur spécialisé et d'un ordinateur pour l'analyse des échantillons.

Les films sensibles utilisés sont destinés à enregistrer les rayonnements électromagnétiques auxquels ils sont soumis. Les émulsions disponibles sur le marché ont des degrés de sensibilité aux rayonnements électromagnétiques variant de 10^{-7} à 10^7 nm. Le type de film à utiliser peut donc varier selon la nature de l'application. Les émulsions sont constituées d'une suspension de microcristaux dans un liant gélatineux. Chaque microcristal, désigné sous le nom de grain, est un halogénure d'argent. La dimension du grain des films varie généralement de 0.2 à 1 μm . La dimension des microcristaux détermine la sensibilité des films à l'action des photons. L'intérêt des détecteurs tient du fait qu'il existe une relation entre la dose de rayonnement absorbée par le film et sa densité après le développement. La courbe représentant cette relation est désignée sous le nom de courbe sensitométrique ou encore de courbe caractéristique. Cette courbe représente la densité du film en fonction du logarithme de son exposition relative.

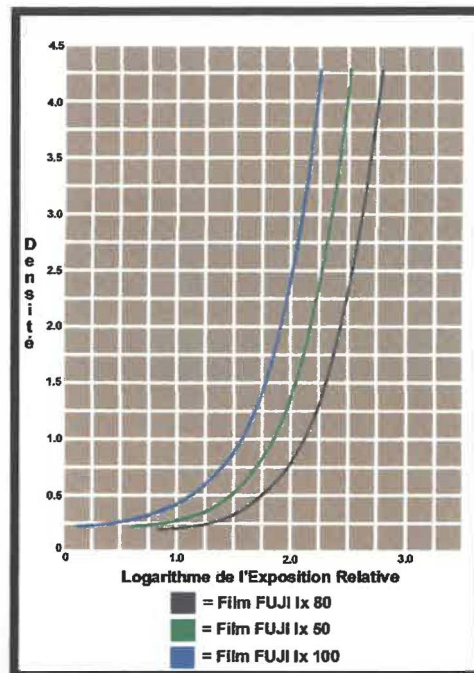


Figure 1.3 : Courbes sensitométriques.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons utilisé des films de radiographie industriels de marque FUJI de type Ix50, Ix80 et Ix100. Nous avons privilégié l'utilisation du film FUJI Ix50 étant donné sa haute définition et son fort contraste découlant de son grain ultrafin. Par contre, cette qualité se fait au prix d'un temps d'exposition plus long et d'une latitude moins élevée. La latitude correspond à l'intervalle d'exposition relative qu'un film a la capacité de représenter avant d'être saturé.

Les figures suivantes illustrent une projection radiographique saisie sur une émulsion photographique. L'objet étudié est un bloc étalon en forme d'escalier. Cet exemple illustre bien la corrélation entre l'épaisseur de la matière traversée par le rayonnement et la densité associée sur un film radiographique. Plus l'épaisseur des sections du bloc étalon est grande, moins la densité associée au niveau du film radiographique sera importante.

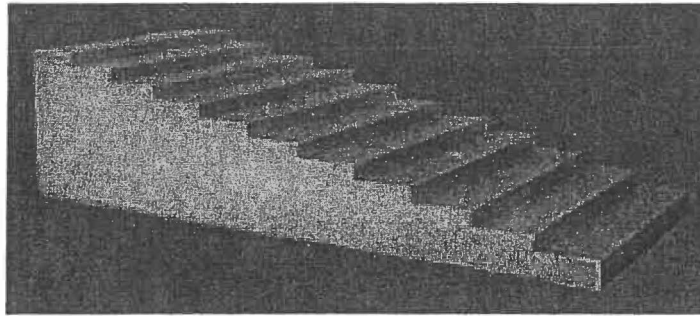


Figure 1.4 : Bloc étalon en escalier.

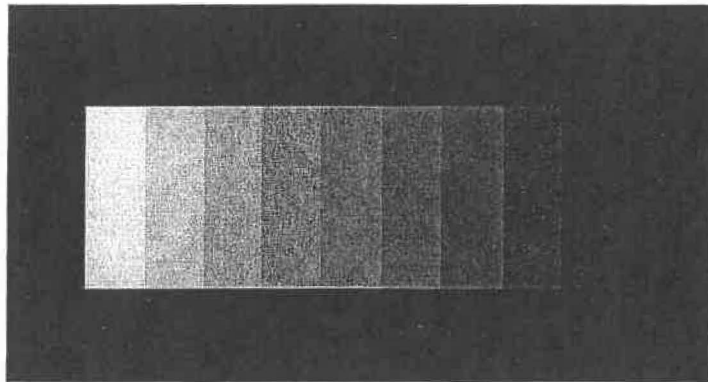


Figure 1.5 : Projection radiographique de bloc étalon.

1.3 Le cas particulier de la radiographie des tubes

L'évaluation de la détérioration de conduites tubulaires peut s'effectuer à l'aide de projections radiographiques. Pour bien comprendre ce cas particulier, nous décrirons dans une première section, la géométrie des conduites étudiées. Ensuite, nous traiterons des différentes techniques de projection radiographique utilisées pour l'analyse des tubes. Dans la section suivante, les différents facteurs influençant la qualité des projections orthogonales seront détaillés. Nous présenterons ensuite les profils d'épaisseurs et l'absorption du rayonnement ionisant dans les tubes. Finalement, un exemple d'impression sur un film radiographique, dans le cas d'un tube, sera présenté. Nous concluons par une présentation des images radiographiques obtenues.

1.3.1 Description de la géométrie des conduites

Des essais non destructifs peuvent être réalisés pour de multiples applications industrielles, manufacturières ou naturelles (troncs d'arbres, structures biologiques in vivo, etc.). Les applications qui retiendront notre attention sont celles reliées au transport des produits à l'aide de conduites ou de canalisations métalliques, en l'occurrence les gazoducs, les pipelines, les conduites hydrauliques.

Nous limiterons notre étude aux conduites tubulaires afin de valider notre approche de contrôle de la qualité des conduites, en l'occurrence la détection de la corrosion. Nous discuterons ultérieurement des pistes envisagées pouvant conduire au traitement des images radiographiques de géométries plus complexes, par exemple pour des conduites en forme de coudes ou de joints en «T». Nous espérons que notre approche sera adaptable à ces géométries.

Dans le but de détecter, quantifier et qualifier les effets de la corrosion sur des conduites métalliques, différents paramètres caractéristiques de la conduite seront estimés. En tout premier lieu, l'épaisseur de la paroi d'une conduite rectiligne sera mesurée selon la direction normale à la paroi. Cette épaisseur est soit nominale ou résiduelle. On appellera *épaisseur nominale* l'épaisseur de la conduite à l'état neuf, l'*épaisseur résiduelle* correspondra à l'épaisseur nominale à laquelle on soustrait les pertes dues à l'érosion ou à la corrosion. On notera OD (« Outside Diameter ») le diamètre externe de la conduite lequel correspond à la plus grande corde reliant deux points appartenant à la paroi externe dans une coupe transversale de la conduite. On supposera uniforme cette épaisseur. Le *diamètre interne* de la conduite, noté ID (« Inside Diameter »), correspondra à la plus longue corde reliant deux points de la paroi interne dans une coupe transversale de la conduite. Ces diamètres sont illustrés ci-dessous.

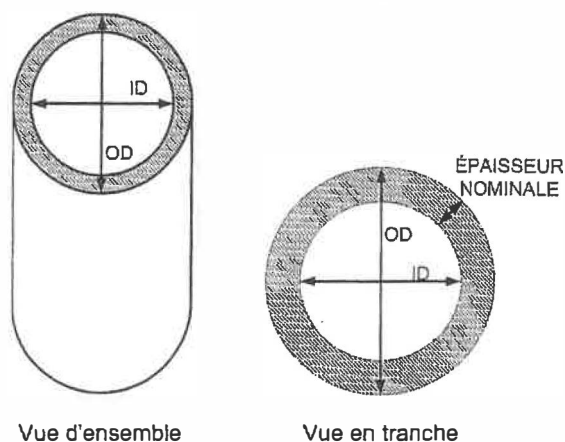


Figure 1.6 : Conduites rectilignes : diamètre et épaisseur.

Lors de la mise au point de notre méthodologie, nous avons utilisé des conduites industrielles, principalement en acier, et ayant de petits diamètres, soit moins de 25 cm.

1.3.2 Projections radiographiques de tubes

Une projection radiographique correspond à la projection d'un objet sur un support photosensible (film ou capteur CCD) soumis à un rayonnement (rayons X, rayons Gamma, etc.).

Dans le domaine des essais non destructifs, trois types de projections radiographiques sont habituellement utilisés, soit les projections panoramiques, tangentielles et orthogonales.

La projection panoramique

Une des méthodes les plus usuelles utilisées lors de tests non destructifs sur des conduites cylindriques ou tubulaires est l'exposition panoramique. Cette technique consiste à enrouler un film radiographique autour de la paroi extérieure d'une conduite et à positionner la source radioactive au centre de la conduite, au niveau de la zone à inspecter. L'image projetée (projection circulaire) correspond à un déroulement sur un plan de la paroi de la conduite. Le schéma ci-dessous illustre cette technique.

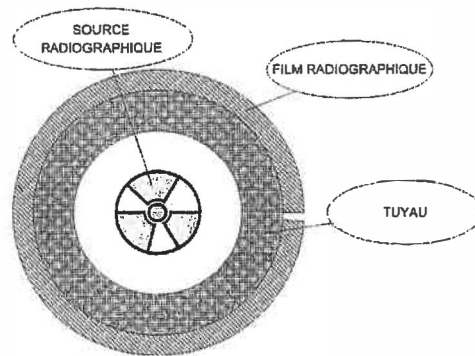


Figure 1.7 : Méthode d'exposition panoramique.

En général, les images ainsi obtenues sont faciles à analyser puisque l'épaisseur du matériel traversée est relativement constante pour l'ensemble de la paroi. Par ailleurs, cette technique est difficile à utiliser sur le terrain. En effet, lorsque les conduites sont de faible diamètre, il est impossible d'introduire le matériel de saisie. De plus, on doit disposer d'un accès à l'intérieur de la conduite afin d'introduire la source radioactive près de la zone d'inspection.

L'utilisation d'un robot commandé à distance de type « crawler », par exemple le GammaMat M-6, peut pallier à ce problème d'accès, or cet équipement est dispendieux et la trajectoire du robot est contrainte par la géométrie des conduites.

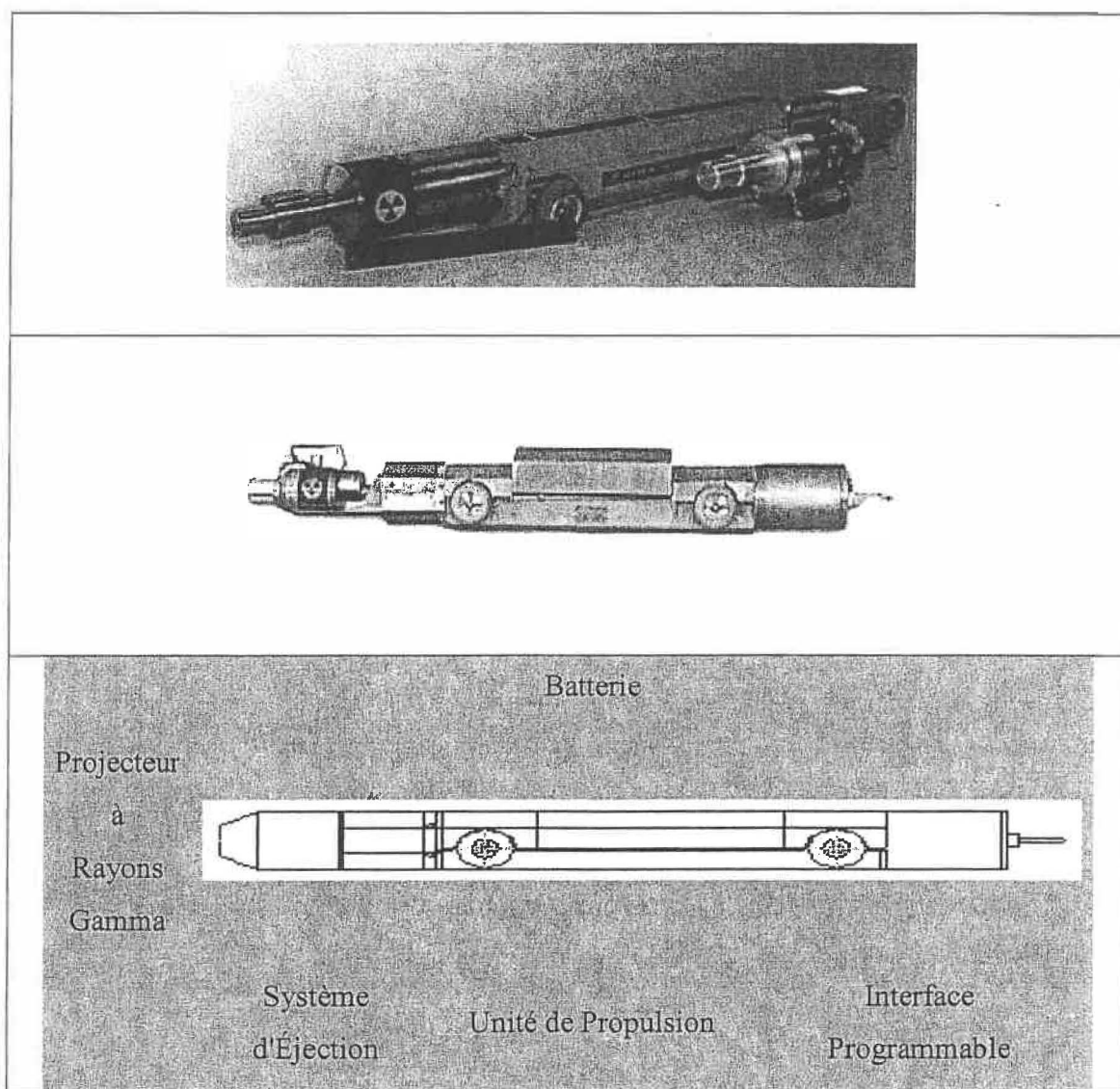


Figure 1.8 : Le Tecnitest Sistema C-0618/G [6] (en haut à gauche) et le GammaMat M-6 [7] (en haut à droite) sont des robots de type « crawler » à projection de rayons gamma conçus pour l'inspection des conduites de diamètre de 15 à 48 cm. L'image du bas représente un schéma général de ce type d'instrument.

Les projections tangentielles et orthogonales

Des alternatives à la projection panoramique sont la radiographie tangentielle et orthogonale, lesquelles sont fréquemment utilisées dans l'industrie lors de tests non destructifs. Ces techniques de projections sont principalement utilisées pour l'estimation des pertes d'épaisseur (érosion et corrosion) des parois de conduites cylindriques. Ces techniques fournissent une projection en coupe des conduites.

Les techniques de projection tangentielle et orthogonale s'avèrent plus polyvalentes que les expositions panoramiques et elles sont utilisées pour analyser des conduites de faible diamètre. De plus, aucun accès à l'intérieur des conduites n'est nécessaire pour la prise de ces clichés. Nous avons donc opté pour cette approche. Cette technique peut aussi être utilisée pour analyser des géométries de conduites telles que des conduites coudées ou des jonctions de type « T » et cela, sans contraintes supplémentaires comme c'est le cas pour les expositions panoramiques appliquées à des conduites dont les géométries compliquent le traitement numérique des projections. L'utilisation de projections tangentielles ou orthogonales, est aussi possible sur des conduites en service.

Le protocole utilisé pour acquérir des images par projections tangentielles ou orthogonales consiste à disposer la source et le film (récepteur) de chaque côté d'une conduite. Une partie du rayonnement émanant de la source traverse la section de conduite visée et laissera une image projetée de la conduite sur le film positionné à l'arrière de la conduite. Cette image est communément nommée image *latente* (voir Figure 1.4).

La différence entre les techniques de projection tangentielle et orthogonale se situe au niveau du positionnement de la source de rayonnement. Dans le cas de la projection tangentielle (voir figure 1.9), la source est localisée de telle façon que l'axe du faisceau ionisant est tangent à la paroi de la conduite. Cette méthode ne permet que le calcul de l'épaisseur d'une seule paroi projetée (section hachurée à la figure 1.9).

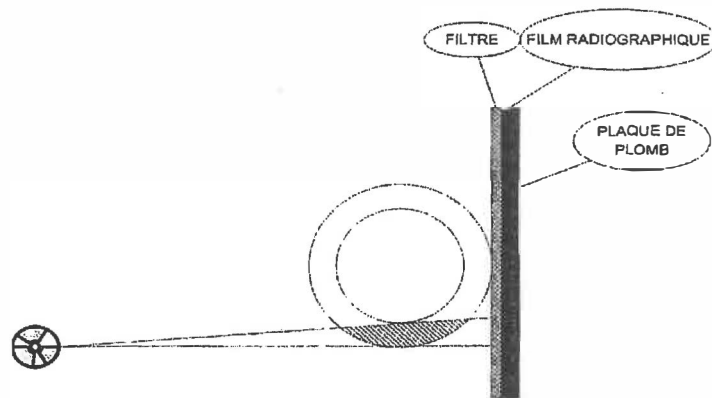


Figure 1.9 : Montage pour une projection tangentielle

Dans le cas de l'analyse par projection orthogonale, la source rayonnante est centrée par rapport à une section de la conduite. Dans ce cas (voir figure 1.10), le calcul d'épaisseur peut être effectué sur les projections des deux parois.

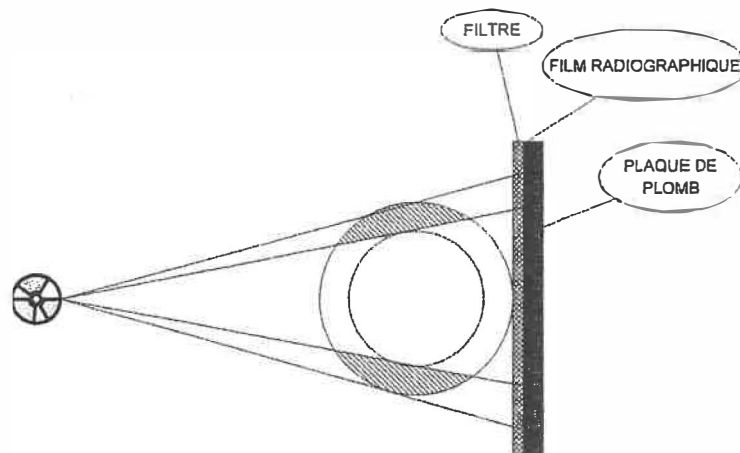


Figure 1.10 : Montage pour une projection orthogonale

Par ailleurs, la projection orthogonale nous permet de recueillir une quantité d'informations supérieure à celle obtenue par projection tangentielle pour un seul cliché.

1.3.3 Facteurs influençant la qualité des projections orthogonales

La qualité des résultats d'une analyse par projection orthogonale est de toute évidence corrélée à la qualité des images. À cet effet, certaines conditions doivent être respectées, principalement en ce qui a trait aux positions relatives de la source d'émission des rayons gamma et du film. Étant donné la nature de la source, on ne peut supposer a priori que celle-ci est ponctuelle et on doit donc minimiser le flou géométrique induit.

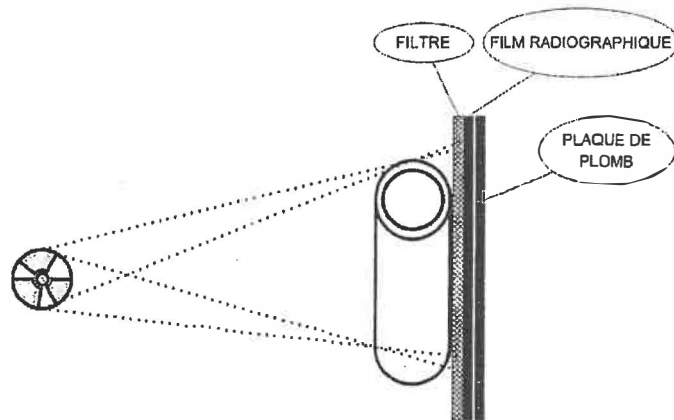


Figure 1.11 : Schéma du montage d'une projection tangentielle.

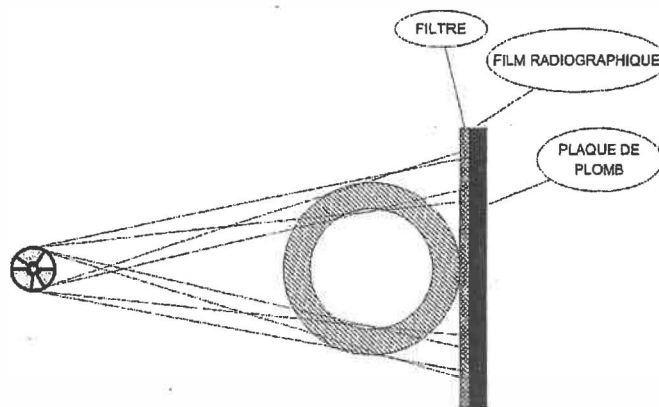


Figure 1.12 : Schéma du montage d'une projection tangentielle vue en tranche.

Un flou géométrique se produit lors de la projection d'un défaut ponctuel. Il apparaît comme une zone floue de dimension supérieure à celle du défaut. Ce phénomène est provoqué par la dimension du foyer de la source d'émission. En effet, plus la source est de grande taille, plus les rayons issus de cette source auront un cône de dispersion large, ce qui induira une image diffuse du défaut (voir figure 1.13).

Bien que la présence d'un flou géométrique est une conséquence directe du caractère non ponctuel de la source, plusieurs autres facteurs influencent le flou géométrique ; par exemple :

- la dimension (L) du foyer d'émission de la source ;
- l'épaisseur (h) de l'objet à radiographier ;
- la distance (y) entre le détecteur et l'objet ;
- la distance (d) entre le foyer et le détecteur (film).

En utilisant ces paramètres, on peut calculer un facteur de flou géométrique qui est utilisé comme indicateur de la qualité des projections radiographiques. Ce facteur, noté F_g , est calculé, comme suit :

$$F_g = L * \left(\frac{h + y}{d} \right) . \quad (1.3)$$

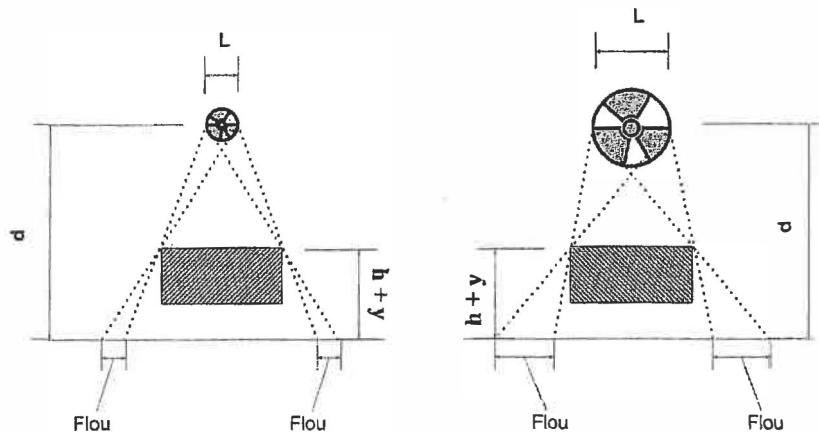


Figure 1.13 : Flou géométrique en fonction de la taille de la source.

De toute évidence, le flou géométrique doit être minimisé afin de s'assurer d'une bonne précision lors du calcul des épaisseurs des parois à partir des images projetées. Dans notre cas, étant donné que le film est en contact avec la conduite, l'équation précédente s'écrit :

$$F_g = L * \left(\frac{OD}{DSF} \right). \quad (1.4)$$

où

OD représente le diamètre externe de la conduite ;

DSF représente la distance entre la source de rayonnement et le film.

Nous avons utilisé des sources dont le foyer avait une taille de 3mm, ce qui nous imposait une contrainte sur la distance entre la source et le film, soit un minimum de 5 fois le diamètre externe des conduites. Le facteur de flou obtenu est au plus de 0.6 mm pour le point de la conduite le plus éloigné du film. Évidemment, plus la section du tube observée est près du film, plus le facteur de flou diminue.

Il existe des sources de rayonnement dont la dimension du foyer émissif est plus petite que celle des sources traditionnelles. Ces sources sont dites à *microfoyer*. L'utilisation de telles sources pourrait favoriser, du moins en théorie, une diminution du facteur de flou géométrique sans avoir à se positionner à de grandes distances entre la source et le film (DSF). Cependant, dans de tels cas, des temps d'exposition de longue durée sont nécessaires étant donné la faible intensité de ces sources. De plus, les coûts du matériel sont des obstacles à leur utilisation à grande échelle. Dans le but de réduire l'apparition de flou géométrique, il suffit de positionner le film le plus près possible de la conduite.

Un autre paramètre de contrôle de la qualité des images est la localisation du film par rapport à la source d'émission. Le film ou le détecteur doit être localisé dans un plan perpendiculaire au cône de projection de la source. Cette position élimine d'éventuelles déformations telles que des dilatations ou des contractions, lesquelles perturberaient les symétries existantes dans la géométrie de l'objet exposé.

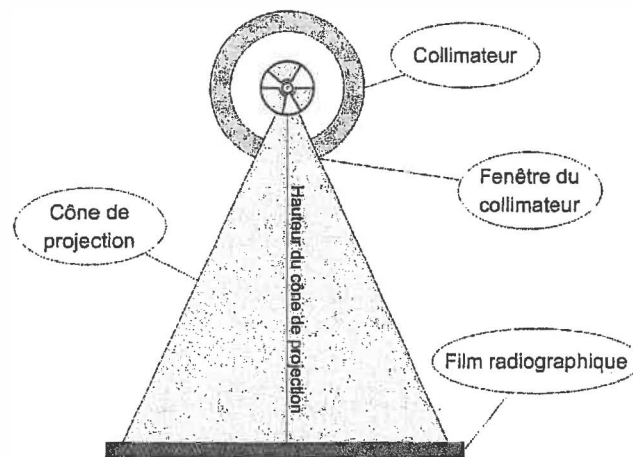


Figure 1.14 : Schéma en coupe du cône de projection.

Lorsque la distance entre la source et le détecteur est relativement grande, une faible proportion du rayonnement émis par la source est captée par le film. On limite le rayonnement de telle façon que l'objet demeure exposé tout en réduisant les pertes de

rayonnement en périphérie de l'objet. Le filtrage s'effectue par l'intermédiaire d'un collimateur. Le collimateur est une enceinte où se trouve confinée la source et dont les parois sont fabriquées dans un matériau spécifique qui limite les pertes de rayonnement. Le plomb est souvent utilisé dans la fabrication des collimateurs, ce qui réduit les pertes du rayonnement. Le collimateur est doté d'une fenêtre de petite dimension par laquelle s'échappe librement le rayonnement en direction de la cible et donc du détecteur. Le rayonnement s'échappe de la fenêtre sous la forme d'un cône dit de projection. Le sommet du cône de projection est le foyer de la source émettrice. La hauteur du cône est la distance entre le foyer et le centre de la cible.

Lorsque les conditions de positionnement source-film citées plus haut ne sont pas respectées, il en résulte des erreurs sur les images numérisées. Par exemple, si les deux parois projetées (A et B) sont de même épaisseur et si la source de rayonnement est décentrée vers le bas en direction de la paroi A (voir figure 1.15), alors le rayonnement parcourra une moins grande distance pour atteindre la paroi A que la paroi B. Puisque l'intensité du rayonnement diminue de façon exponentielle en fonction de la distance parcourue, le rayonnement traversant la paroi A sera de plus grande intensité que celui traversant B. Il en résultera une image asymétrique des parois projetées. De plus, dans ce type de saisie, un facteur d'agrandissement est appliqué à l'image réelle (effet du cône de projection versus la position de la source) et ce dernier déforme l'image des parois. Conséquemment, si les distances entre chacune des parois et le film sont identiques, ce facteur d'agrandissement sera le même, sinon une correction doit être apportée pour chacune des parois afin de normaliser l'image résultante. Il est donc important d'effectuer un centrage de la source par rapport à la conduite.

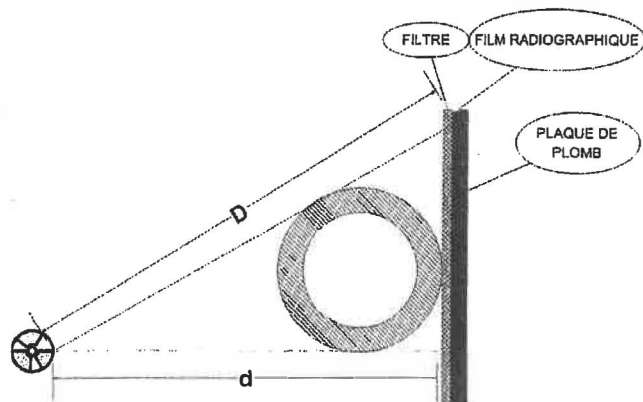


Figure 1.15 : *Déplacement transversal de la source radioactive.*

Par ailleurs, lorsque la source est décentrée longitudinalement par rapport à la conduite, la symétrie de l'image projetée est aussi affectée, puisque deux coupes transversales, symétriques par rapport au centre transversal de la conduite, ne recevront pas la même dose de rayonnement. Ce positionnement éloigne une section de la conduite par rapport à la source, ce qui a pour effet d'augmenter l'angle d'attaque du rayonnement sur la conduite. Une plus grande épaisseur de matériau sera donc traversée par le rayonnement sur la partie la plus éloignée de la section de la conduite.

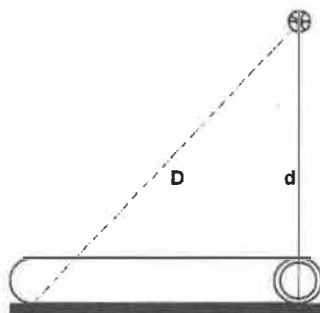


Figure 1.16 : *Décentrage longitudinal de la source émettrice.*

1.3.4 Profil d'épaisseur et absorption du rayonnement dans les tubes

Pour une projection orthogonale de conduite tubulaire effectuée selon le schéma présenté dans la figure 1.17, le rayonnement ionisant traversant la conduite est absorbé selon un patron d'atténuation particulier.

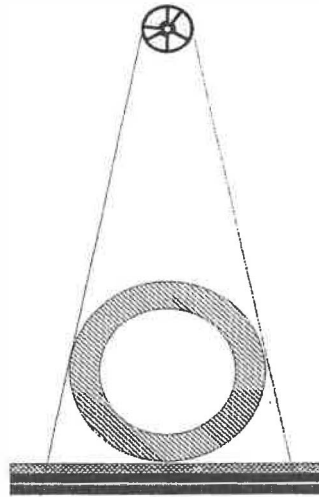


Figure 1.17 : Schéma de projection orthogonale d'une conduite tubulaire.

Lorsque la source de rayonnement est placée en position centrale par rapport à une coupe de la conduite (voir figure 1.17) alors, pour une conduite sans défaut, le rayonnement passant par le centre de la conduite et perpendiculairement à la surface du détecteur traversera une épaisseur de matière équivalent à deux fois l'épaisseur des parois de la conduite (voir figure 1.18). Plus l'angle d'attaque du rayonnement s'éloigne de la verticale, plus l'épaisseur de matériau traversé augmente et lorsque le rayonnement est tangent à la paroi interne alors l'épaisseur de matériau traversée est la plus importante. Dès que cette tangente est atteinte, l'épaisseur de matériau traversé décroît rapidement pour atteindre une valeur nulle lorsque le rayonnement est tangent à la paroi externe de la conduite. La figure 1.19 représente l'évolution de l'épaisseur traversée en fonction de la position le long d'un profil pour une conduite de 10,16 cm de diamètre externe et d'une épaisseur nominale de 6.4 mm. On y identifie clairement le passage par

un maximum d'épaisseur à l'interface de la paroi interne de la conduite ainsi que la décroissance rapide de l'épaisseur en périphérie de la conduite.

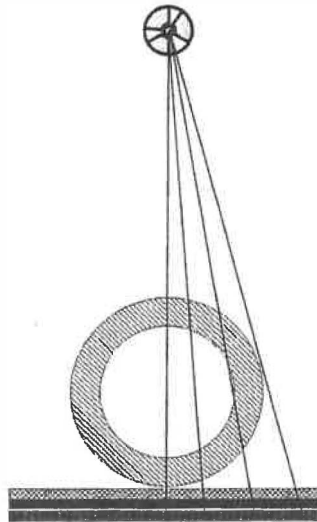


Figure 1.18 : Parcours du rayonnement traversant une conduite tubulaire.

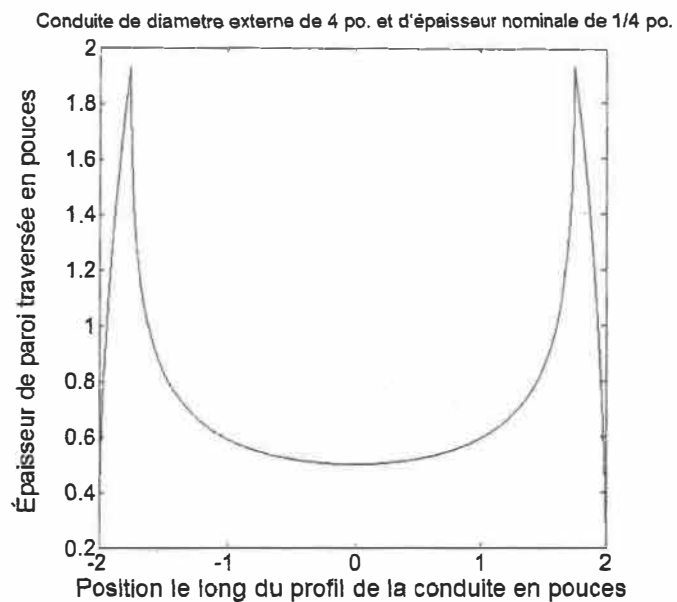


Figure 1.19 : Épaisseur de matériau traversé en fonction de la position le long d'un profil transversal.

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'évolution des niveaux de gris des clichés radiographiques n'est pas directement proportionnelle aux épaisseurs de matériau traversées. La figure 1.20 illustre l'évolution des niveaux de gris le long d'un profil de conduite. On constate que la courbe 1.20 b) diffère de la courbe présentée à la figure 1.19. L'évolution rapide des épaisseurs pour les positions en périphérie de l'interface de la paroi interne de la conduite n'est pas reproduite par les niveaux de gris sur le film radiographique.

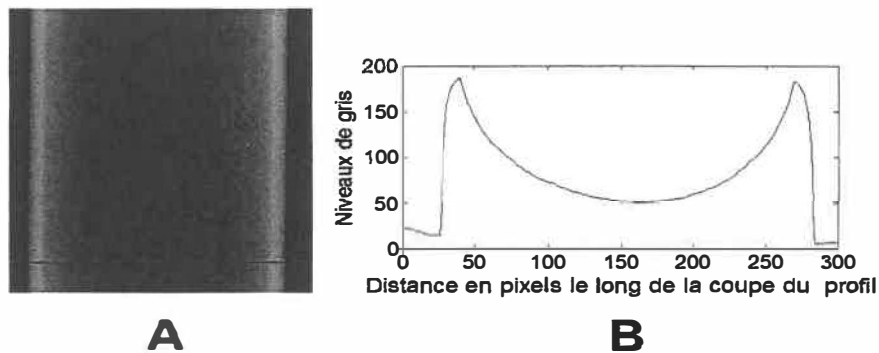


Figure 1.20 : Niveaux de gris (B) du profil (A) (en rouge de gauche à droite).

1.3.5 Impression sur film radiographique des tubes : description des images

La figure 1.21 représente une radiographie tangentielle sur laquelle on distingue (en niveaux de gris) trois zones distinctes. La première zone (1) est appelée l'*arrière-plan* de l'image (partie noire) et elle est constituée des pixels extérieurs à la conduite. La deuxième zone (2) est l'union de deux régions qui correspondent à la paroi supérieure et inférieure de la conduite. Ces deux sections sont parallèles à la direction longitudinale de la conduite rectiligne et elles se situent à la limite de l'*arrière-plan* et de la paroi interne de l'image. La frontière entre cette zone et la zone du fond de la conduite correspond aux parties de la paroi pour lesquelles les rayons traversent le plus de matière sans rencontrer de vide.

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'évolution des niveaux de gris des clichés radiographiques n'est pas directement proportionnelle aux épaisseurs de matériau traversées. La figure 1.20 illustre l'évolution des niveaux de gris le long d'un profil de conduite. On constate que la courbe 1.20 b) diffère de la courbe présentée à la figure 1.19. L'évolution rapide des épaisseurs pour les positions en périphérie de l'interface de la paroi interne de la conduite n'est pas reproduite par les niveaux de gris sur le film radiographique.

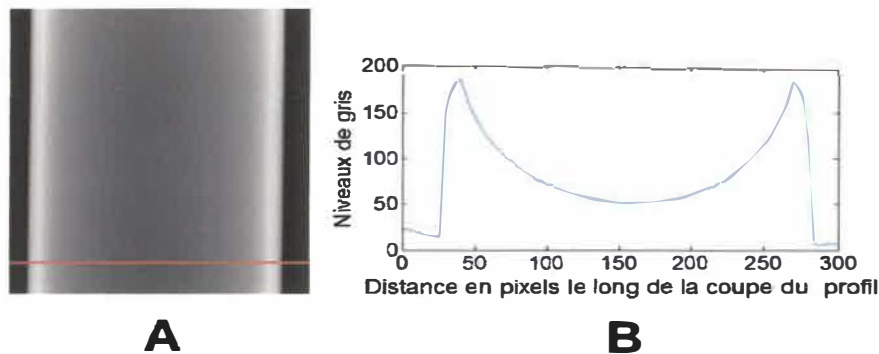


Figure 1.20 : Niveaux de gris (B) du profil (A) (en rouge de gauche à droite).

1.3.5 Impression sur film radiographique des tubes : description des images

La figure 1.21 représente une radiographie tangentielle sur laquelle on distingue (en niveaux de gris) trois zones distinctes. La première zone (1) est appelée l'*arrière-plan* de l'image (partie noire) et elle est constituée des pixels extérieurs à la conduite. La deuxième zone (2) est l'union de deux régions qui correspondent à la paroi supérieure et inférieure de la conduite. Ces deux sections sont parallèles à la direction longitudinale de la conduite rectiligne et elles se situent à la limite de l'arrière-plan et de la paroi interne de l'image. La frontière entre cette zone et la zone du fond de la conduite correspond aux parties de la paroi pour lesquelles les rayons traversent le plus de matière sans rencontrer de vide.

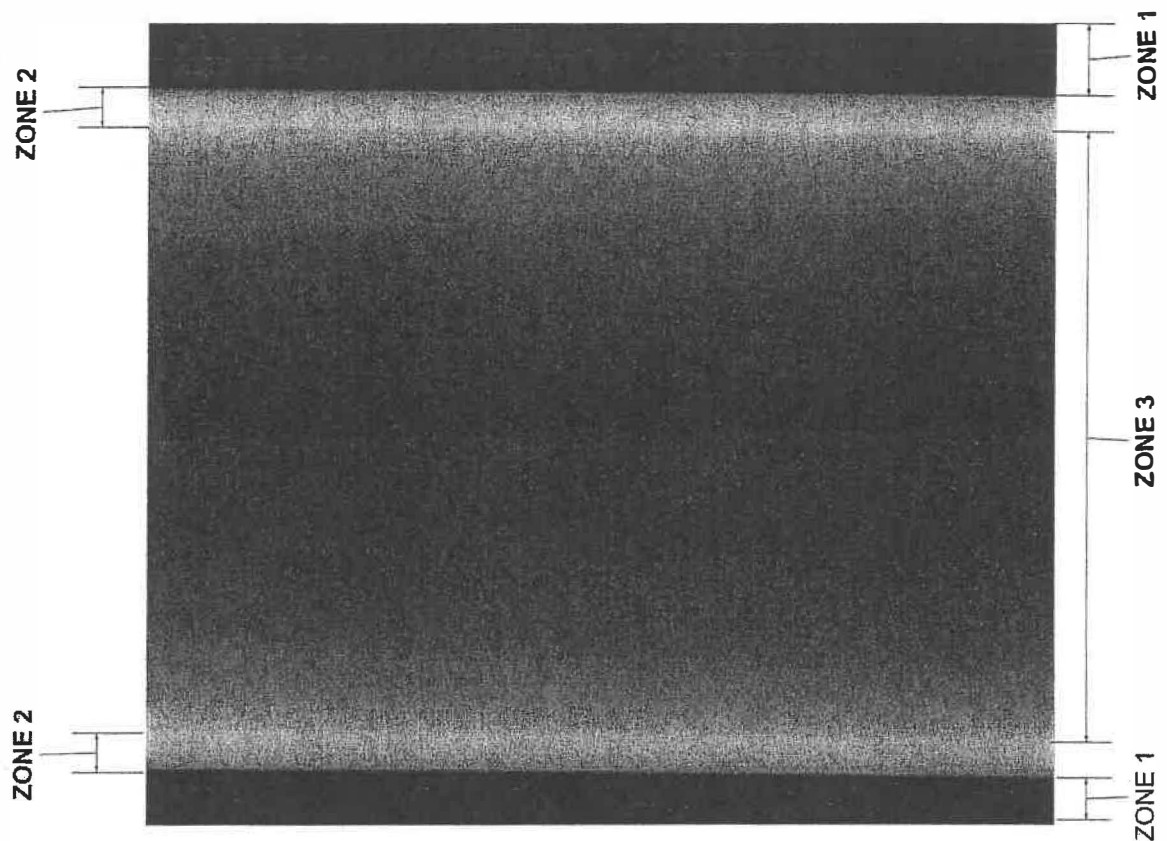


Figure 1.21 : Résultat d'une projection tangentielle par rayonnement gamma d'une conduite rectiligne.

En utilisant une définition similaire à celle de BURKLE [4], nous supposerons que la paroi de la conduite correspond à la région comprise entre deux plans que nous définissons comme suit :

le plan (P1) est formé des droites tangentes à la conduite atteignant le film en partant de la source radioactive (que nous supposerons ici idéale et donc ponctuelle) et qui interceptent les points du diamètre externe OD (« outside diameter ») de la conduite,

le plan (P2) est formé des droites émanant de la source qui atteignent le film et qui sont tangentes aux points du diamètre interne ID (« inside diameter ») de la conduite.

La troisième zone (3) est appelée le *fond de la conduite*. Cette région est localisée entre les parois supérieure et inférieure (2) de la conduite. Cette zone correspond à la partie de la conduite pour laquelle les rayons ionisants traversent successivement la première face cylindrique de la conduite, la partie intérieure et la face arrière de la conduite. Cette partition en trois zones de l'image projetée d'un objet 3D sur un plan est caractéristique des conduites rectilignes tubulaires et le signal obtenu est une fonction de la quantité de matériel traversée par le rayonnement.

1.4 Usure et corrosion

Pendant leur durée de vie utile, les conduites industrielles subissent, dans leur environnement opérationnel, diverses agressions internes ou externes. On classe en plusieurs catégories les causes de bris ou d'usure, notamment :

- l'érosion due à l'abrasion provoquée par des substances véhiculées par ces conduites ou les substances environnantes ;
- les attaques mécaniques provenant des interventions humaines telles que des rayures extérieures provoquées par des chocs ou des heurts ;
- l'application de forces mécaniques (usure mécanique, dilatation, contraction dans les matériaux);
- les chocs thermiques (variation brusque des températures environnantes) pouvant causer des fissures dans le matériau ;
- la mauvaise qualité des matériaux ou de l'assemblage des pièces.

L'usure ou le bris de conduites métalliques peuvent être provoqués par la corrosion. Dans LANDOLT [5] on retrouve la définition suivante de la corrosion ; « *une réaction interfaciale irréversible d'un matériau avec son environnement, qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement.* »

On conclut que la corrosion se produit à l'interface entre le matériau de la conduite et le milieu interne, mais aussi à l'interface de la conduite et du milieu externe. Il existe plusieurs types de corrosion, dont nous discuterons plus loin. Tous les facteurs d'agression énumérés ci-haut ont un point en commun : *une perte de l'épaisseur du matériau sur les parois des conduites*. Une perte d'épaisseur peut être locale (piqûre) ou générale (diffuse, répartie). Par ailleurs, nous excluons la détection ou l'étude des bris et limiterons notre étude à la détection de la corrosion. Nous ne traiterons pas non plus le problème de la détection et de l'estimation des dimensions des fissures. Ce problème s'avère difficile et il nécessite la prise en compte de l'angle relatif entre les fissures et les rayons atteignant ces mêmes fissures.

D'un point de vue chimique, la corrosion des métaux est provoquée par une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant présent dans son environnement. L'oxydation du métal implique une réduction de l'agent oxydant. Il existe quelques cas d'exceptions parmi les mécanismes de corrosion, mais ceux-ci sortent du cadre de ce mémoire. Le lecteur intéressé par ces aspects peut se référer à l'ouvrage de LANDOLT [5].

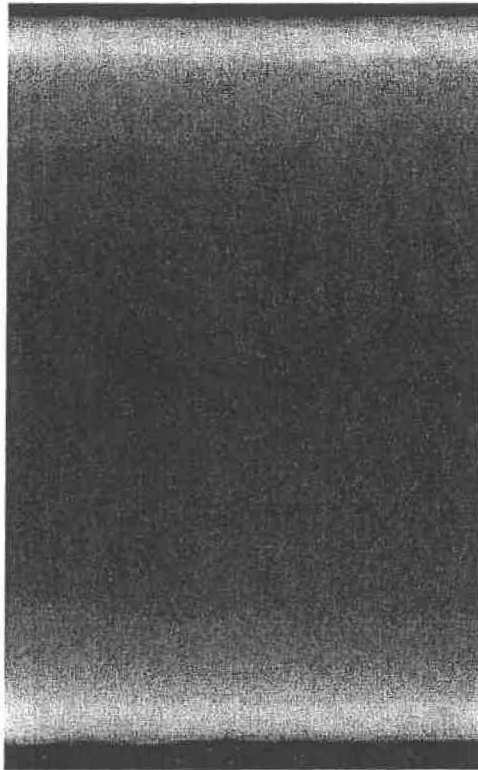


Figure 1.22 :
Conduite d'acier de 11,43 cm de diamètre externe présentant une forte corrosion externe.

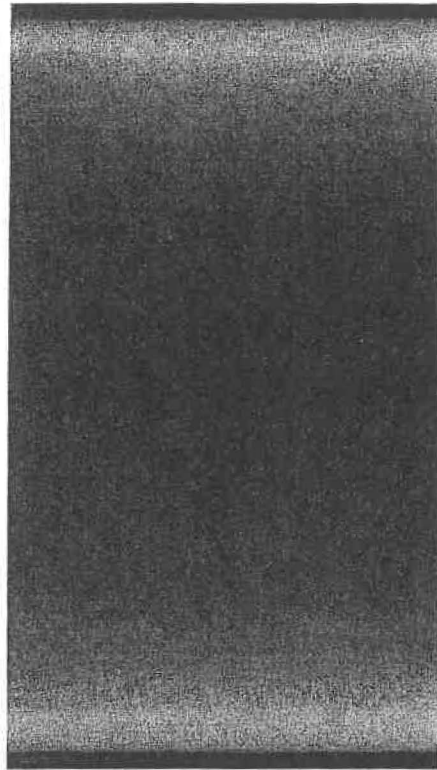


Figure 1.23 :
Conduite d'acier de 11.43 cm de diamètre externe présentant une forte corrosion interne.

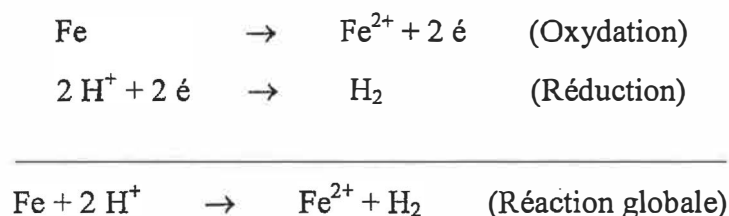
Les réactions d'oxydoréduction se présentent comme suit :



À titre d'exemple, si nous prenons une réaction de corrosion entre le fer (Fe) et l'acide chlorhydrique (HCl), nous obtenons la réaction chimique suivante :



Lors de cette réaction de corrosion, les ions Cl^- n'apparaissent pas car ils n'y participent pas directement, mais ils se lieront aux ions ferreux dès que la réaction sera complète pour donner du FeCl_2 . Les réactions d'oxydoréduction se décomposent en deux réactions partielles, une anodique et une cathodique, qui font intervenir les électrons échangés dans la réaction globale. La réaction partielle d'oxydation, aussi appelée réaction partielle anodique, correspond à une perte de charge négative et à une transformation en ions positifs de l'anode de la réaction. La réaction partielle de réduction (cathodique) est le gain en charges négatives par la cathode. Lors d'une oxydoréduction du fer par l'acide chlorhydrique, nous obtenons les schémas de réactions partielles suivants :



Bien qu'issue de réactions d'oxydoréduction, la corrosion des conduites peut s'exprimer sous différentes formes selon les facteurs environnementaux qui interviennent dans la réaction, par exemple :

- la composition chimique et la microstructure du métal ;
- la composition chimique de l'environnement ;
- les paramètres physiques (température, convection, irradiation, etc.) ;
- les sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottements).

On trouve une classification de la corrosion dans FONTANA [8] :

- **La corrosion uniforme** est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Dans ce cas, la surface entière du métal est à la fois une anode et une cathode. Cette attaque se produit notamment lorsque les métaux sont exposés à un milieu acide ;
- **La corrosion galvanique**, aussi appelée corrosion bimétallique, est provoquée par la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux. Ceci intensifie la dégradation du métal le moins résistant ;
- **La corrosion caverneuse** est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. On observe une attaque sélective du métal dans les fentes et les endroits peu accessibles pour l'oxygène ;
- **La corrosion par piqûres (puits de corrosion)** est provoquée par la présence de certains anions, notamment le chlorure, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Cette corrosion se traduit par des cavités caractéristiques de quelques dizaines de micromètres de diamètre ;
- **La corrosion intergranulaire** correspond à une attaque sélective au niveau des interfaces des grains métalliques d'un matériau. Souvent, ce phénomène est présent dans des phases qui ont précipité lors d'un traitement thermique ;
- **La corrosion sélective** est l'oxydation d'un composant d'un alliage, avec comme conséquence une structure métallique poreuse ;
- **La corrosion érosion** est causée par une réaction électrochimique combinée à une agression mécanique répétée sur une structure. Par exemple, cette corrosion est observée sur des structures métalliques exposées à l'écoulement rapide d'un fluide ;
- **La corrosion sous contrainte** est une fissuration du métal qui résulte de l'action conjointe d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique.

On trouve ci-dessous un tableau schématique qui illustre ces huit catégories de corrosion.

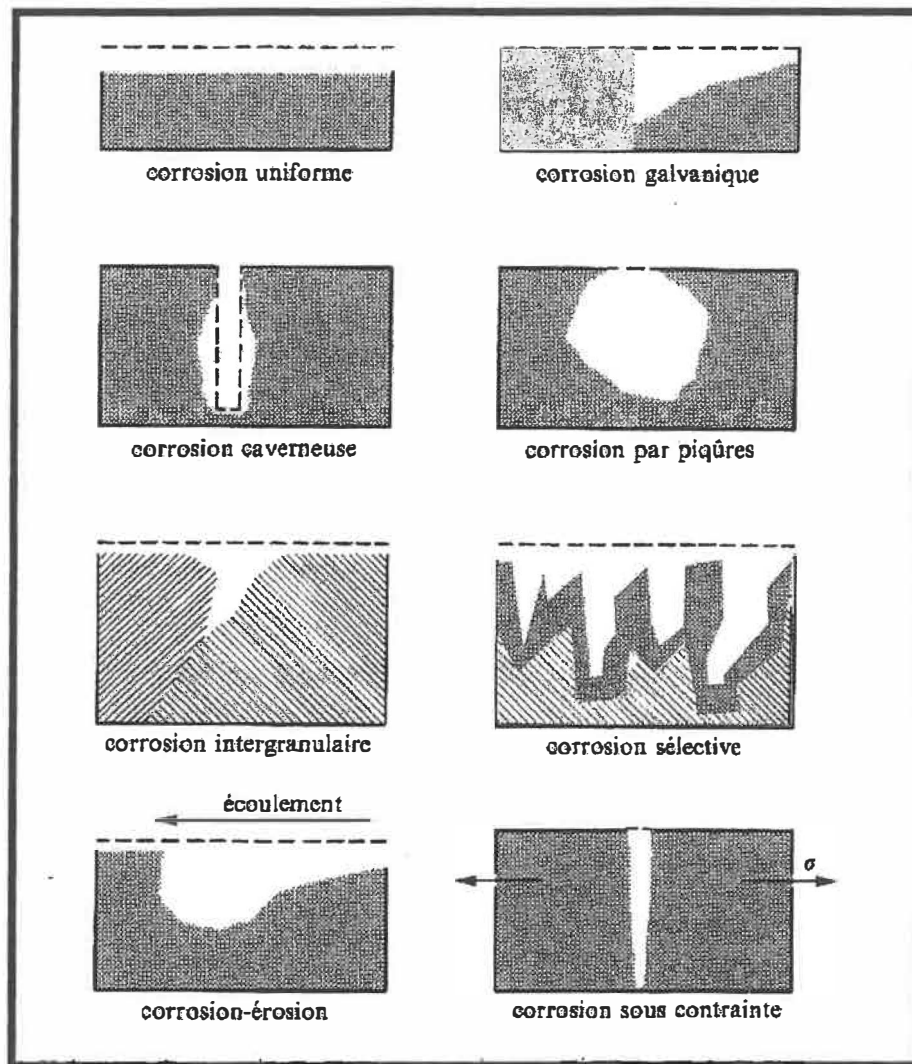


Figure 1.24 : Les huit types de corrosion selon Fontana.

Afin de détecter ces différents types de corrosion sur un échantillon de conduite, les clichés radiographiques doivent être analysés. Le chapitre suivant présente donc différentes méthodes d'analyse rencontrées dans la littérature scientifique.

Chapitre 2

Analyse des images radiographiques : rétrospective

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les méthodes usuelles de détection, de quantification et d'estimation de la corrosion à partir de projections orthogonales (tangentielles) de conduites métalliques. Nous débutons ce chapitre par une description des concepts de base des méthodes manuelles, automatisées et hybrides (semi-automatiques). Les différentes techniques du calcul de l'épaisseur des parois corrodées sont présentées. Finalement, nous justifierons, à la lumière des méthodes présentées, l'approche que nous avons retenue dans notre projet.

2.2 Les méthodes

Les méthodes rencontrées dans la littérature se différencient principalement selon le niveau d'intervention du facteur humain au sein de l'analyse.

2.2.1 Méthodes manuelles

Nous appellerons méthodes manuelles les techniques utilisées lors de la prise des mesures de corrosion sans l'appui d'un logiciel d'analyse d'images automatisé. Ces méthodes sont basées sur l'observation visuelle des images couplée à l'expérience du technicien. Les mesures (tailles des puits de corrosion, etc.) sont prises directement sur le film ou sur une image numérique. L'utilisateur recherche essentiellement les zones affectées et en mesure l'épaisseurs (parois) ou les dimensions (puits de corrosion). Une telle analyse est rapide et peu coûteuse, d'où son usage fréquent dans l'industrie.

En contrepartie, les résultats obtenus sont partiellement subjectifs et ils varient selon les inspecteurs, étant donné les imprécisions dans le repérage des limites des parois et des puits de corrosion. Précisons que les outils de mesure, par exemple la règle ou le pied à coulisse, ne sont pas précis lorsqu'ils sont utilisés sur des pellicules radiographiques. Précisons aussi que cette technique ne permet qu'une évaluation portant sur l'usure de quelques points précis des sections de conduites choisis par le technicien et qu'elle est silencieuse sur l'état global de la conduite.

SOOD [9] présente une vue d'ensemble d'un système d'analyse manuelle. En résumé, l'inspecteur sélectionne, à l'aide d'un dispositif de pointage connecté à un ordinateur, deux points (sur la paroi ou de part et d'autre d'une défectuosité) sur l'image et la distance entre ces deux points est calculée avec une précision de l'ordre d'un pixel, soit la précision de l'image numérisée. Par contre, la localisation visuelle des frontières des conduites ajoute une incertitude supplémentaire.

2.2.2 Méthodes automatisées

Les méthodes automatisées utilisent des algorithmes de reconnaissance de formes. L'intérêt de ces méthodes est leur rapidité de traitement dans l'extraction d'une multitude d'informations tant statistiques que morphologiques sur les images numérisées. Par exemple, nos propres analyses automatisées s'effectuent, sans optimisation du code, en moins de 3 minutes à l'aide d'un processeur AMD Duron® 1800+, sur des images de huit bits et de 1000 pixels par 1000 pixels. De telles approches nous permettent d'effectuer un contrôle de qualité sur l'ensemble de la radiographie d'une conduite sans nous limiter à l'estimation de l'épaisseur minimale comme c'est souvent le cas pour les analyses par des méthodes manuelles. De plus, l'utilisation d'algorithmes, développés en regard des objectifs, nous permet d'obtenir une consistance dans les résultats indépendamment de l'opérateur. De tels systèmes automatisés nous permettent de détecter la position des frontières des parois et des puits de corrosion en modélisant les propriétés physiques des objets inspectés et d'estimer l'épaisseur des parois (voir chapitre suivant). Cependant, des erreurs subsisteront toujours étant donné la sensibilité inhérente des méthodes automatisées aux variations des niveaux de gris, souvent imperceptibles à l'œil humain.

2.2.3 Méthodes hybrides

Les méthodes hybrides ou semi-automatiques constituent un compromis. Une intervention manuelle peut s'avérer nécessaire afin de corriger une détection de formes erronées faite par les algorithmes. Ces erreurs de détection peuvent être des éraflures, des soudures ou des superpositions d'objets sur les conduites comme la présence de marqueurs de plomb par exemple. Dans de tels cas, une intervention humaine est souhaitée afin de pallier aux déficiences des modèles. À titre d'exemple, certaines méthodes hybrides peuvent nécessiter l'intervention d'un opérateur lors de la sélection des régions d'intérêt à traiter sur les images ou pour préciser les zones à segmenter.

2.3 Mesures des épaisseurs des parois

Plusieurs auteurs (SIK LEE [2], EKINCI [10], RHEINLÄNDER [11], BELENKIJ [12]) se sont intéressés à la mesure de l'épaisseur résiduelle des conduites tubulaires. Parmi les algorithmes de mesure proposés, on distingue deux approches. Une première approche consiste à corréler la densité en un point d'un film radiographique à une mesure d'épaisseur. La seconde approche consiste plutôt à mesurer directement l'épaisseur des sections des parois visibles sur une projection radiographique orthogonale. Ces deux approches peuvent être implémentées sur la base d'un procédé manuel, automatique ou hybride.

Dans cette section, nous présenterons ces deux approches de mesures d'épaisseur et nous introduirons les travaux effectués par différents auteurs sur ce problème.

2.3.1 Mesures d'épaisseur par densité

Tel que traité au chapitre précédent, la densité sur un film exposé à un rayonnement est inversement proportionnelle à la quantité de matière traversée. Bien que cette relation ne soit pas linéaire, il est possible d'extraire des mesures d'épaisseur par un calcul sur la densité des films (courbes standardisées intensités vs épaisseurs).

Cette technique ouvre la voie au calcul d'une mesure précise de l'épaisseur en tout point issue de la projection par rayon X d'un objet pour des géométries de conduites variées, sans augmenter la complexité des calculs.

BELENKIJ [12] nous propose dans son article une méthode d'analyse basée sur les mesures d'épaisseur par densité de film. La procédure exige la modélisation d'une équation inverse des différentes interactions entre les rayons ionisants et la matière. En fait, BELENKIJ [12] propose de modéliser entièrement sous forme d'équation tous les facteurs qui influencent la densité du film sensible lors du processus radiographique. Ensuite, il propose d'inverser l'équation trouvée pour en arriver à une équation qui donne l'épaisseur de matière traversée en fonction de la densité du film en un point.

Pour en arriver à cette modélisation, BELENKIJ [12] procède à une lourde tâche de calibration qui consiste à radiographier une cible équivalente à la cible à radiographier, mais avec des paramètres d'épaisseur connus. On entend par cible équivalente une cible qui possède le même diamètre externe et la même épaisseur nominale que la cible à examiner et qui est composée du même matériel. Les paramètres radiographiques à utiliser pour la calibration et pour la radiographie de la cible doivent être identiques. C'est-à-dire que la position du film et de la source par rapport à la cible, la puissance de la source, le temps d'exposition et le type de filtre utilisé doivent être exactement les mêmes pour la prise du cliché à analyser et pour la prise du cliché d'étalonnage.

Toutes ces contraintes sont bien évidemment très difficiles et longues à mettre en œuvre en dehors d'un environnement standardisé. En effet, dans le cas des analyses effectuées en chantier, où le type de conduite et les paramètres radiographiques utilisés changent d'un cliché à l'autre, ceci entraînerait l'obligation de posséder une quantité innombrable de sections de conduite pour l'étalonnage et de prendre pratiquement un cliché d'étalonnage pour chaque radiographie à analyser. Sachant que les campagnes d'inspection nécessitent plusieurs dizaines de clichés, cela fait de cette méthode une technique trop coûteuse en temps et en argent pour la mettre en œuvre dans notre cas. C'est donc pour cette raison que nous n'avons pas retenu cette façon de faire.

EKINCI [10] propose une technique des mesures d'épaisseur à partir d'une corrélation entre la densité locale d'un film et l'épaisseur traversée par le rayonnement. Cette méthode est manuelle et elle s'effectue à l'aide d'un densitomètre (manuel) qui fournit une mesure de densité en chaque point du film. Afin d'établir une courbe standard du calcul des épaisseurs, la conduite étudiée et un bloc étalon en escalier, fait du même matériau, sont exposés dans les mêmes conditions (voir figure 2.1). L'épaisseur du bloc doit couvrir un ensemble de valeurs allant jusqu'à deux fois l'épaisseur de paroi de la conduite. Il est donc possible d'estimer les épaisseurs en fonction des densités du film utilisé par extrapolation. Par ailleurs, cette approche ne permet que la détection des épaisseurs des parois de l'image, mais pas celle du fond de la conduite.

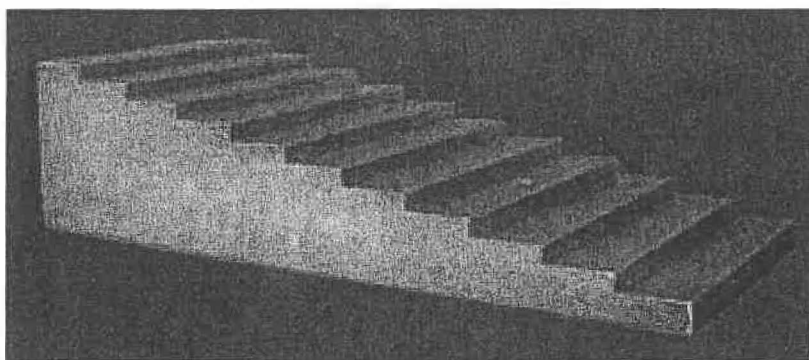


Figure 2.1 : Bloc étalon en escalier (step wedge).

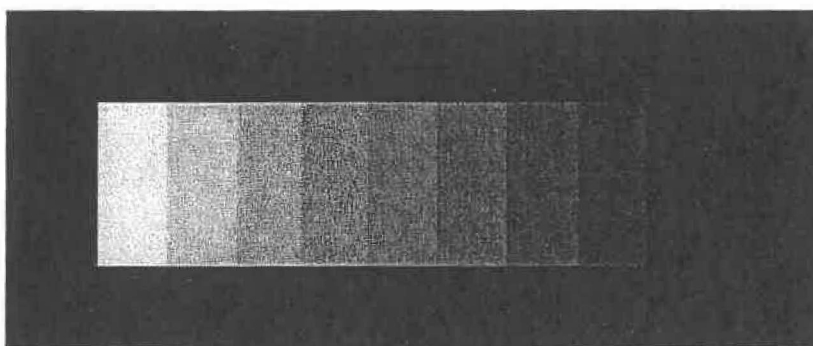


Figure 2.2 : Projection d'un bloc en escalier.

Il est fréquent que des puits de corrosion contiennent des dépôts tels que des résidus de tartre, du sable ou du produit de corrosion. Ces débris provoquent l'atténuation du rayonnement ionisant lors de son passage au travers des parois de la conduite et contribuent ainsi à une surestimation de l'épaisseur. De plus, cette approche ne nous

permet pas de tenir compte des variations de la densité du film dues à la projection conique de la source vers le film. La figure 2.3 illustre ces variations d'intensité. On observe clairement une différence dans les intensités pour deux coupes transversales de la conduite identiques, mais situées respectivement à l'extrémité et au centre du film. La position centrée du bloc étalon par rapport au film induit donc un biais sur l'estimation des épaisseurs en périphérie des sections de conduites analysées.

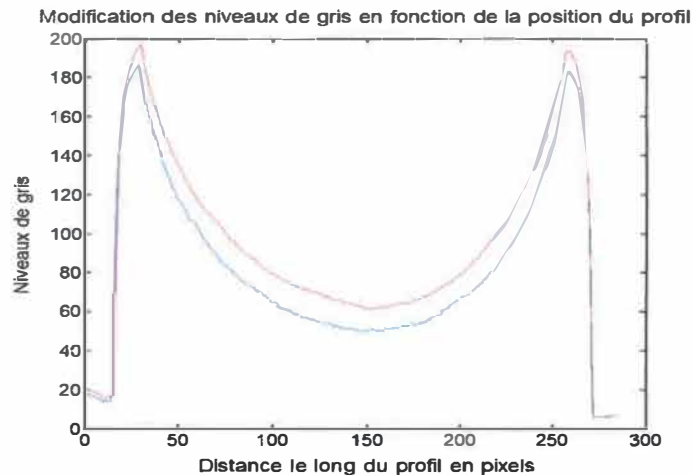


Figure 2.3 : Représentation des niveaux de gris sur deux profils d'une même conduite.
Courbe bleue : niveaux de gris d'un profil sous la source irradiante ; courbe rouge : profil en périphérie de la conduite.

2.3.2 Mesures d'épaisseur par coupe

Une autre approche utilisée pour le calcul des épaisseurs est une prise de mesure par coupes transversales (EKINCI [10]). Cette approche consiste à mesurer directement l'épaisseur de la paroi des conduites sur une projection radiographique tangentielle. Des relations géométriques doivent être établies entre la source de rayonnement, le film et la conduite afin de compenser l'effet du facteur d'agrandissement de la projection.

Selon EKINCI [10], la relation entre la dimension réelle de la conduite et la dimension apparente sur la projection est donnée comme suit :

$$t_g = t_i \cdot \frac{(SDF - 0.5 \cdot OD)}{SDF} \quad (2.1)$$

où,

t_g = dimension réelle (cm) ;

t_i = dimension apparente sur la projection (cm) ;

OD = diamètre externe de la conduite (cm) ;

SDF = distance entre la source de rayonnement et le film (cm).

Cette approche ne permet pas une analyse des épaisseurs sur le fond de l'image de la conduite, mais elle a certains avantages. En l'occurrence, on peut mesurer la perte de matériau sur la paroi avec précision, même en présence de dépôts ou de produits de corrosion. On note aussi l'absence de calibration comme c'est le cas pour les techniques par mesure de densités. On trouve à la figure 2.4 une illustration de ce procédé.

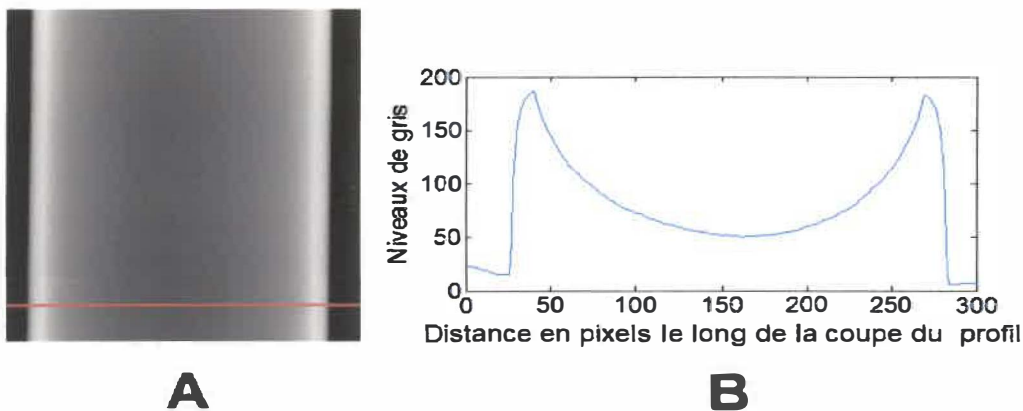


Figure 2.4 : Niveaux de gris (B) du profil A (en rouge de gauche à droite).

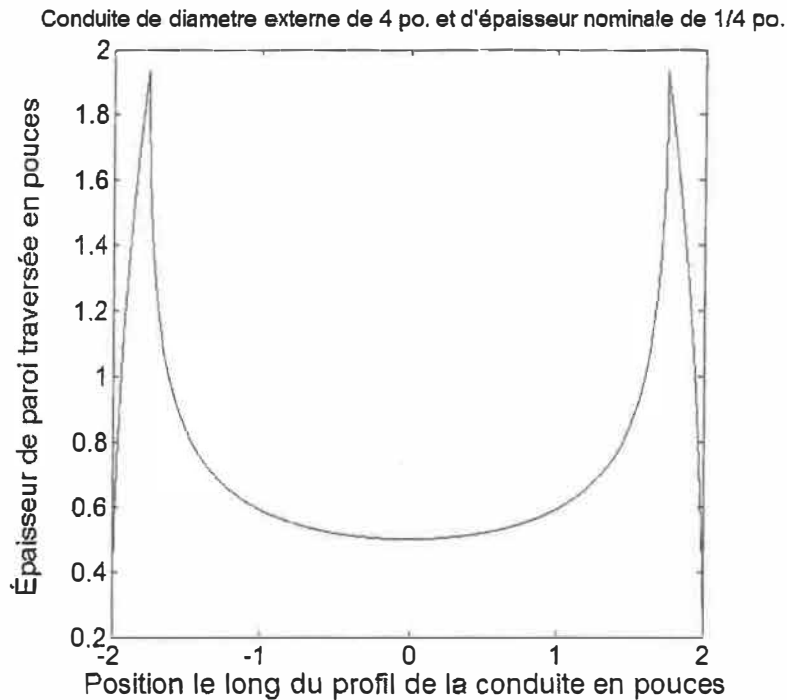


Figure 2.5 : Épaisseurs de matériau traversé en fonction de la position le long d'un profil pour une conduite de 10,16 cm de diamètre externe et d'une épaisseur nominale de 64 mm.

Nous avons opté pour cette dernière approche puisqu'elle peut être adaptée lors de son utilisation en milieu industriel étant donné l'absence de procédures d'étalonnage. Les clichés résultants d'inspections régulières sont directement utilisables dans les calculs statistiques, sans contraintes techniques lors de la saisie (blocs étalons) ou de prises de clichés d'étalonnage supplémentaires. De plus, cette méthodologie est valide pour des conduites en service (circulation de substances).

Chapitre 3

Algorithmes de détection des contours

Tel que mentionné dans les sections précédentes, l'objectif de ce projet de recherche est la mise en œuvre d'un outil de traitement des images visant la détection de la présence de corrosion et la quantification de cette corrosion dans des conduites métalliques tubulaires industrielles. Le diamètre externe des conduites visées varie de 25 mm à 254 mm, et leurs épaisseurs nominales varient de 2 mm à 13 mm.

La méthodologie développée à cet effet est constituée d'une séquence d'algorithmes de traitement des images numérisées de conduites. Dans ce chapitre, nous présenterons une vue d'ensemble de cette séquence de traitements.

3.1 Caractéristiques des images numérisées

Plusieurs facteurs influencent la qualité de l'acquisition des images radiographiques. Certains de ces facteurs ne peuvent être éliminés dans la pratique sans que l'acquisition s'effectue dans un environnement contrôlé. Notamment, la structure interne de la cible, la conduite, peut induire une déviation d'une proportion des rayons ionisants, provoquant au niveau du détecteur une réaction de nature aléatoire. Les rayons qui ont traversé la cible et le détecteur peuvent aussi être réfléchis selon des trajectoires imprévisibles et atteindre à nouveau le détecteur. De plus, des rayons n'ayant pas atteint la cible peuvent être réfléchis par des obstacles présents dans l'environnement et percuter à leur tour le détecteur en des positions imprévisibles. Ces phénomènes de réfraction incontrôlables créent un bruit blanc ponctuel présent sur l'ensemble des images radiographiques.

Le type de détecteurs utilisé peut aussi affecter la qualité des images. Au niveau des films sensibles, plus la dimension du grain est petite, plus la définition du film est grande. De plus, les films à grains plus fins requièrent une exposition au rayonnement plus grande pour réagir. Dans un tel cas, nous minimisons la présence de bruit blanc sur les images, car le rayonnement réfléchi diminue significativement en puissance et il ne peut atteindre le film avec une intensité suffisamment forte pour le faire réagir.

La non-uniformité de l'illumination lors de l'exposition aux rayons est un paramètre qui influence la qualité des images. En effet, bien que la source radioactive soit centrée sur la conduite lors de la prise des clichés radiographiques, on remarque que les sections situées en périphérie de l'image sont plus pâles (intensité réduite) que celles situées au centre de l'image. Ce phénomène s'explique principalement par deux facteurs. Premièrement, plus les rayons atteignent des zones éloignées par rapport au centre de la conduite, plus leur atténuation sera importante étant donnée une plus grande distance parcourue. Deuxièmement, les rayons traversant la conduite en périphérie atteignent la conduite avec un angle non perpendiculaire à la paroi. Ces rayons doivent donc traverser une épaisseur de matière plus importante de la conduite que s'ils la traversaient en son centre.

Finalement, l'utilisation des films sensibles pour l'acquisition des images radiographiques ne nous permet généralement pas de déterminer exactement l'intervalle des densités présentes sur l'image finale. Pour cette raison, l'échelle des niveaux de gris sur les films numérisés varie d'une image à l'autre sans que l'échelle de tous les niveaux de gris soit entièrement utilisée.

3.2 Filtrage des images numérisées

Après l'étape de numérisation, une première étape de traitement consiste à améliorer le contraste des images. Cette étape de rehaussement du contraste est ponctuelle, c'est-à-dire que l'opération de rehaussement s'effectue pixel par pixel et sans tenir compte des informations dans le voisinage de chaque pixel. On peut exprimer une telle opération ponctuelle à l'aide d'une équation de la forme $B(x,y)=f[A(x,y)]$ où $A(x,y)$ représente l'intensité d'un pixel de coordonnées (x,y) , $f(u,v)$ est la fonction de correction du niveau de gris du pixel $A(x,y)$ et $B(x,y)$ est le résultat de cette transformation.

Les opérations ponctuelles peuvent être utilisées selon les objectifs visés. Par exemple, pour pallier à certaines faiblesses de certains appareils de numérisation, ce qui n'est pas le cas dans le cadre de notre application puisque nous utilisons un numériseur de qualité avec une profondeur d'image supérieure à nos besoins. Notre objectif est le rehaussement de contraste dans le but de détecter la corrosion.

Afin d'améliorer le contraste des images numérisées de conduites, nous utilisons l'histogramme des niveaux de gris de l'image. L'axe des ordonnées d'un tel histogramme représente la fréquence des classes de niveaux de gris représenté sur l'axe des abscisses. On peut associer un tel histogramme à une fonction de densité en probabilité. En pratique, on détermine le nombre de classe de niveaux de gris de l'histogramme. Dans notre cas, on utilise 256 niveaux, soit le nombre maximum de niveaux de gris.

Même si l'histogramme associé à une image ne couvre pas l'ensemble des 256 niveaux de gris, le rehaussement du contraste dans l'image demeurera réalisable. Notre approche consiste à modifier les niveaux de gris de l'image à l'aide d'une fonction de transformation ponctuelle des niveaux de gris de façon à couvrir l'ensemble des niveaux de gris disponibles.

La fonction de rehaussement du contraste est celle présentée dans CASTLEMAN [13] :

$$f(A(x,y)) = \left[(A(x,y) - \text{MIN}(A(i,j))) * \left(\frac{256}{\text{MAX}(A(i,j)) - \text{MIN}(A(i,j))} \right) \right] \quad (3.1)$$

où

$\text{MIN}(A(i,j))$ et $\text{MAX}(A(i,j))$ sont respectivement le minimum et le maximum des intensités de niveaux de gris de l'image. Si une image présente des niveaux de gris avec un minimum à 0 et un maximum à 256, alors l'image est inchangée par f . Dans ce dernier cas, le contraste est considéré déjà rehaussé.

Aucune étape de filtrage supplémentaire n'a été effectuée afin d'éliminer le bruit blanc présent dans nos images, ceci afin d'éviter une perte additionnelle d'informations. Une fois le contraste des images amélioré, nous pouvons passer à l'étape de la segmentation qui nous permettra d'extraire la conduite de l'image numérisée.

3.3 Segmentation des images : élimination du fond de l'image

Dans notre application, la segmentation est une opération importante ayant pour but d'extraire notre objet d'étude, soit la projection de la conduite, par l'élimination de l'arrière-plan. Les opérations de segmentation sont généralement implémentées à partir d'algorithmes de seuillage. Plusieurs de ces algorithmes ont été testés lors de la mise au point de notre méthodologie.

Une caractéristique inhérente à nos images, dont il faut tenir compte dans cette étape de segmentation, est la proximité (valeurs d'intensité proches) des niveaux de gris des pixels de l'arrière-plan avec ceux des pixels voisins de la frontière externe de la conduite (parois projetées).

Cette particularité est illustrée à la figure 3.1 sur laquelle on observe deux minimums locaux des niveaux de gris aux positions 25 et 280 d'une coupe transversale. Les pixels en ces coordonnées linéaires correspondent approximativement aux positions des frontières externes de la conduite.

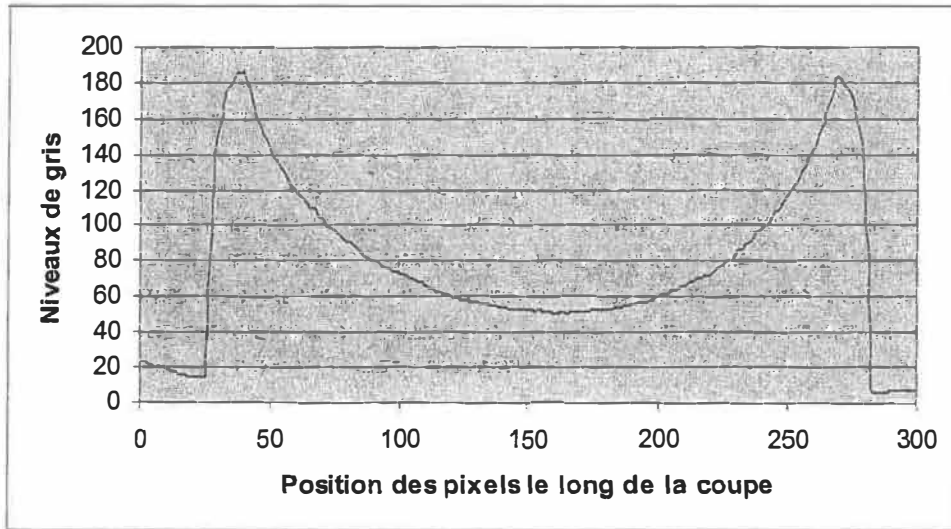


Figure 3.1 : Distribution des niveaux de gris sur une coupe transversale.

On constate un chevauchement entre les niveaux de gris appartenant à la conduite et ceux en périphérie à l'arrière-plan de l'image. Ceci est dû à une sous-exposition au rayonnement ionisant en périphérie de la pellicule radiographique. Ce phénomène nous oblige donc à aller plus loin qu'une simple segmentation basée uniquement sur l'histogramme des niveaux de gris pour déterminer la zone à isoler en excluant les niveaux de gris présents dans l'arrière-plan (fond de l'image) et au niveau des parois. On doit donc combiner un critère de positionnement par rapport à la géométrie de la conduite à celui des niveaux de gris. Par ailleurs, la forme et la position de la conduite sont inconnues à ce stade du traitement. Pour pallier à cette difficulté, nous avons opté pour une approche de repérage de la conduite en deux étapes. La première étape consiste en une segmentation grossière de l'image à partir d'un seuil fixé afin de localiser approximativement la position, la forme et l'orientation de la conduite.

La seconde étape procède par raffinement et elle consiste à parcourir l'image selon des coupes transversales à la conduite identifiée précédemment. Ce qui permet le repérage final des frontières de la conduite selon certains critères décrits plus loin dans cette section.

Afin de réaliser une première segmentation, nous avons effectué un seuillage global à partir d'une valeur fixée (constante) de niveaux de gris déterminé pour l'ensemble des images analysées. Tel qu'anticipé, cette approche ne pouvait s'appliquer étant donné la variabilité de l'exposition d'une image à une autre, la proximité des niveaux de gris entre l'arrière-plan et les frontières des parois, ainsi que la non uniformité de l'éclairage de l'arrière-plan. Une première solution consistait à effectuer un filtrage radiométrique de l'image avant l'application d'un seuil. Cette solution n'a pas été retenue dans le cadre de notre projet étant donné sa complexité et une mise en œuvre onéreuse et contraignante dans la durée pour des images acquises dans des environnements non contrôlés. Une autre option qui s'offre à nous est l'identification d'un seuil caractéristique pour chacune des images à analyser. L'identification de ce seuil peut être automatique ou faite manuellement par un technicien qui sélectionne à l'aide d'un périphérique de pointage le niveau de séparation des zones dans l'histogramme. Une méthode hybride, soit automatique et manuelle, pourrait être envisagée.

Dans le cadre de notre étude, l'approche de la détermination automatique d'un seuil a été privilégiée, car une telle approche nous permet d'éliminer l'incertitude causée par la subjectivité due au facteur humain dans la détermination de la position exacte des limites de la conduite. De plus, les résultats d'une telle approche s'avéreront stables pour l'ensemble des analyses d'une même image. Par ailleurs, il existe une infinité d'images possibles, en l'occurrence toutes les possibilités obtenues par la superposition d'objets sur les radiographies. Il s'avérerait donc peu probable de mettre au point une technique de détection automatique à toute épreuve pouvant s'adapter à toutes les situations rencontrées.

Pour cette raison, nous avons opté pour l'implémentation d'une technique de détection hybride. Cette technique permettra à un opérateur de corriger la situation dans le cas où le seuil automatique conduirait à des résultats aberrants ou inadéquats. L'identification d'un seuil s'effectue à l'aide de l'histogramme des niveaux de gris.

Dans le cas d'images numérisées de conduites tubulaires, l'histogramme des niveaux de gris a une forme particulière dont nous pourrions tirer profit (voir figure 3.2). En effet, chaque coupe transversale d'une conduite présente un profil des niveaux similaires dans sa forme, et par conséquent un histogramme des niveaux de gris similaire.

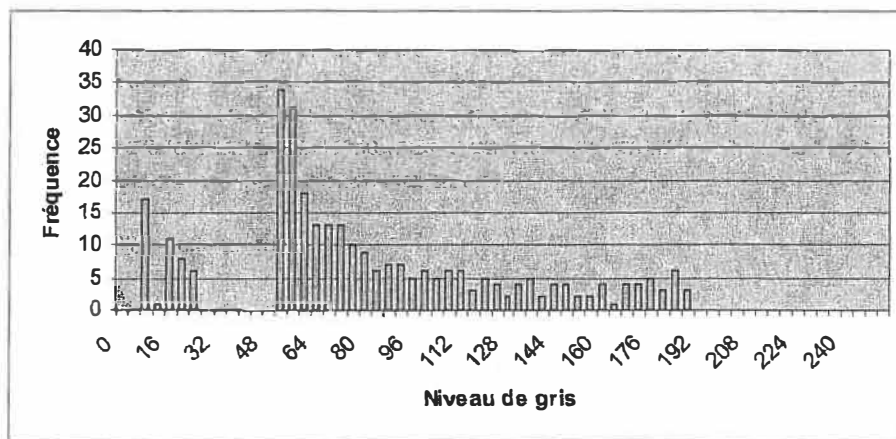


Figure 3.2 : Histogramme des niveaux de gris d'une coupe transversale

L'histogramme total d'une image de conduite est équivalent à la sommation des histogrammes de chacune des coupes transversales de cette image. Il a donc pratiquement la même forme que l'histogramme d'une coupe transversale, mais avec une modification de l'échelle des fréquences. Notre but est de trouver un seuil de séparation de l'histogramme permettant d'éliminer les valeurs de niveaux de gris appartenant au fond de la conduite avec le moins d'erreurs possible. Pour la coupe transversale d'une conduite sans le fond de l'image (« background »), nous obtenons le profil des niveaux de gris présenté à la figure 3.4 et l'histogramme des niveaux de gris de ce profil à la figure 3.5.

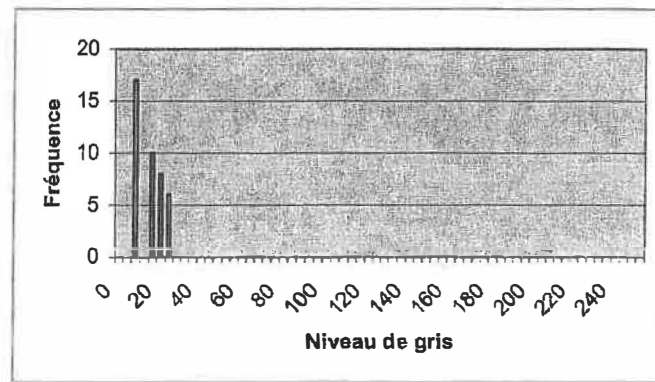


Figure 3.3 : Histogramme des niveaux de gris des pixels du fond dans une coupe transversale.

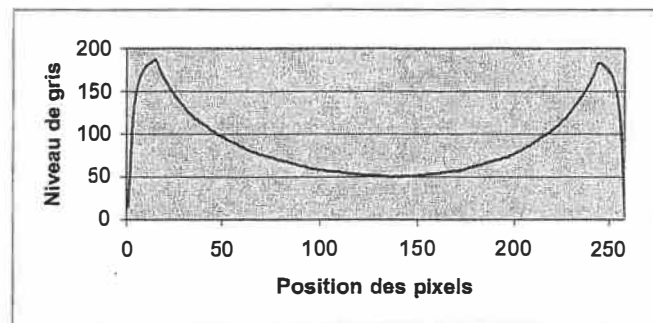


Figure 3.4 : Profil des niveaux de gris d'une coupe excluant le fond.

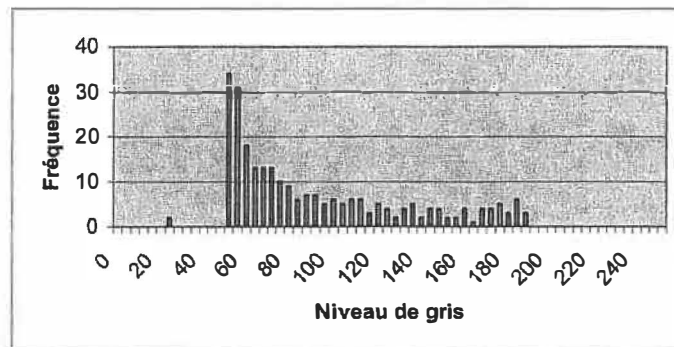


Figure 3.5 : Histogramme des niveaux de gris d'une coupe excluant le fond.

On constate que l'histogramme à la figure 3.2 contient deux modes distincts et marqués. Par contre, la partie de l'histogramme correspondant aux pixels de la conduite n'est pas distribuée selon une loi normale d'où l'impossibilité d'utiliser une classification bayésienne pour identifier un seuil de segmentation avec une erreur minimale. Afin de valider cette hypothèse, des tests ont été réalisés sur plusieurs images lesquels ont

clairement démontré une variabilité dans les résultats et l'obtention de seuils erronés dans certains cas. Une autre approche, laquelle a conduit à des résultats plus stables et réalistes, consiste à utiliser comme seuil de segmentation la valeur minimale des fréquences des niveaux de gris située entre les deux modes de l'histogramme afin d'isoler le fond des images. Or, le bruit influence la forme de l'histogramme des fréquences et des opérations de lissage sont donc nécessaires pour atténuer ce dernier. CASTLEMAN [13] propose l'application d'un filtre de convolution sur l'image ou encore un ajustement de la courbe de l'histogramme afin de réduire le bruit afin de repérer adéquatement le minimum local entre les deux modes de l'histogramme. Nous avons donc opté pour un lissage de l'histogramme des fréquences en regroupant dans 64 classes de niveaux de gris les 256 niveaux de gris originaux, suivi de l'application d'un filtre moyen et de la localisation du minimum local. Les figures suivantes illustrent successivement une image de conduite, son histogramme et l'image binaire résultante. Dans le présent cas d'étude, le seuil de segmentation $s = 46$ a été déterminé de façon automatique.

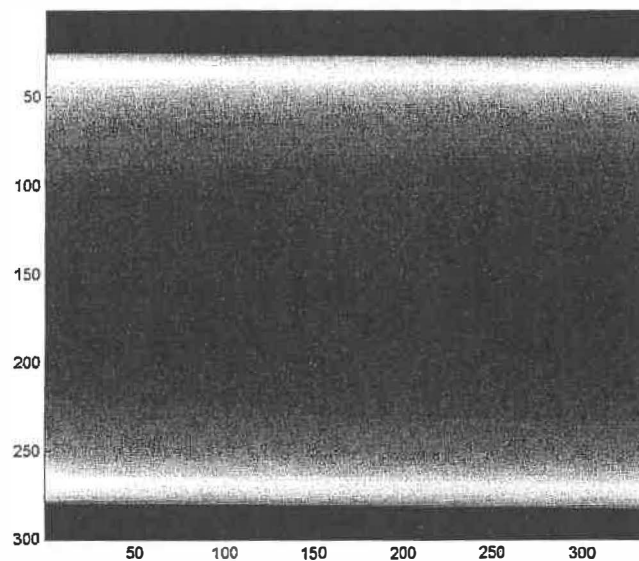


Figure 3.6 : Image originale d'une projection de conduite droite ayant subi une opération d'amélioration de contraste.

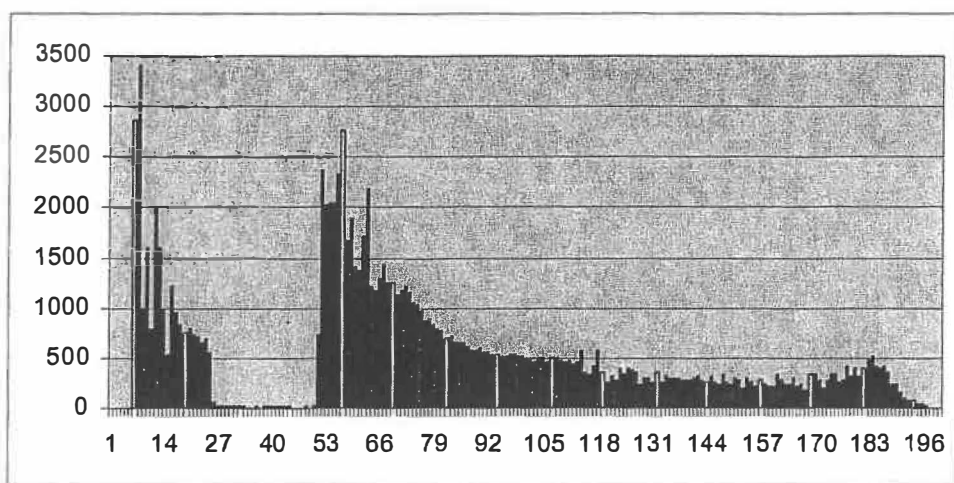


Figure 3.7 : *Histogramme des niveaux de gris de l'image présentée à la figure 3.6*

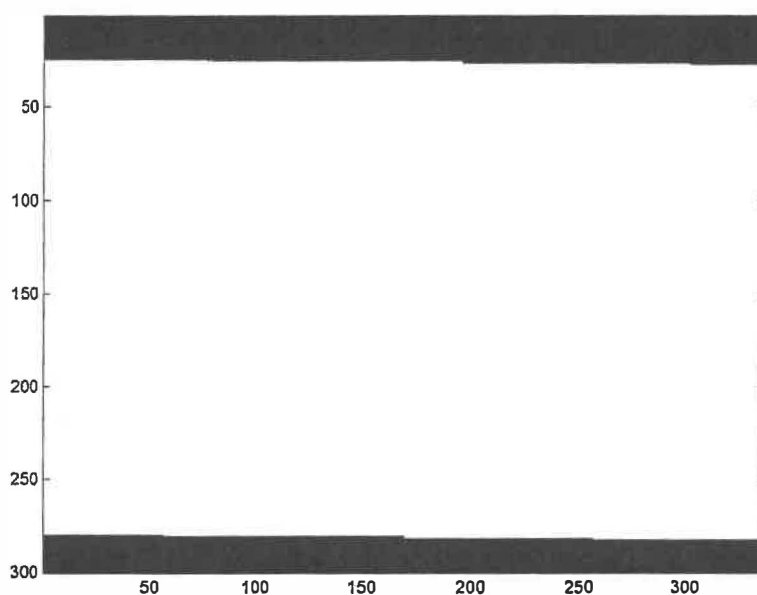


Figure 3.8 : *Affichage de la forme binarisée de l'image présentée à la figure 3.6*

3.4 Détection des parois

À cette étape, nous avons une approximation de la localisation d'une conduite et donc de ses frontières (parois projetées). Dans le but d'effectuer des mesures d'épaisseur précises des parois, nous devons raffiner le repérage des parois. La précision de ce repérage des frontières internes et externes de notre conduite est intimement corrélée à la précision des résultats de la méthodologie proposée.

Avant de procéder au repérage des frontières, nous procédons au calcul de l'orientation de la conduite, en fait de ses frontières. À partir de cette orientation approximative des frontières, il sera possible de préciser la position exacte des frontières par l'analyse des coupes transversales à cette orientation de la conduite. L'application d'un filtre de Sobel (CASTLEMAN [13]) permet de localiser les points appartenant aux deux frontières de la conduite binarisée. Sur une image binaire telle que celle présentée à la figure 3.8, le filtre de Sobel repère les zones de transition entre le noir et le blanc. Nous avons utilisé deux opérateurs de Sobel de dimension 3x3 un répondant aux transitions verticales et l'autre aux transitions horizontales. La forme de ces deux opérateurs est présentée à la figure suivante.

<table><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr></table>	-1	-2	-1	0	0	0	1	2	1	<table><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>-2</td><td>0</td><td>2</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1
-1	-2	-1																	
0	0	0																	
1	2	1																	
-1	0	1																	
-2	0	2																	
-1	0	1																	
Opérateur vertical	Opérateur horizontal																		

Figure 3.9 : Opérateurs de Sobel de dimension 3x3.

Ces deux opérateurs sont utilisés pour une opération de convolution sur l'image binaire. Si le résultat obtenu pour un pixel est différent de zéro pour un opérateur ou pour les deux, le pixel en question est identifié comme appartenant à une zone de transition. Par la suite, sur l'ensemble des pixels retenus sur chacune des deux parois, nous effectuons une régression linéaire. Ces droites de régression constituent des approximations des frontières externes de la conduite binarisée. L'orientation de la conduite nous est fournie par les pentes de ces deux régressions.

Plusieurs algorithmes de recherche de frontières ont déjà été développés en vision artificielle. Notamment, des algorithmes de détection de frontières utilisant le Laplacien, la segmentation selon le gradient de l'image, l'opérateur de Sobel, de Roberts ou de Prewitt. Ces approches ont été testées sur nos images, mais aucune d'entre elles n'a fourni les résultats attendus étant donné le caractère continu de la courbe des niveaux de

gris au passage des parois ou frontières des images étudiées. En effet, les opérateurs à la base de ces filtres ne sont performants que dans le cas de coupures (discontinuités) apparentes des niveaux de gris des pixels situés de part et d'autre d'une frontière. Ce qui n'est pas notre cas étant donné la proximité des niveaux de gris au voisinage des frontières. Ces filtres n'étant pas performants dans le cadre de notre application, on doit s'interroger sur les caractéristiques propres aux frontières afin de développer une méthodologie de segmentation adaptée à notre problème.

En regard des notions de radiographie présentées au chapitre deux, on se rappellera que la projection de la frontière interne de la conduite coïncide avec les points (pixels) de coupes distinctes où les rayons ionisants atteignant le film sont le plus atténués. Cette frontière interne est donc caractérisée par un maximum de luminance locale si on parcourt l'image selon des coupes transversales à la conduite. La frontière interne est donc facilement repérable et elle sera d'autant plus précise car cette propriété de luminance maximale reste valable même en l'absence de correction radiométrique. Si on parcourt les pixels de l'image perpendiculairement à partir de la paroi interne vers l'extérieur de la conduite nous constatons que la paroi externe de la conduite est caractérisée par une forte variation positive du gradient de l'image après un passage par une valeur négative minimum du gradient.

Finalement, le repérage des parois s'effectue selon les directions perpendiculaires à l'orientation de la conduite dans le voisinage des frontières de l'image (zone d'intérêt). Pour chacune des tranches transversales de la conduite, nous localisons les deux maximums locaux correspondants aux parois internes inférieures et supérieures. À partir de chacun des pixels associés à ces maxima, nous parcourrons à nouveau l'image dans les mêmes directions vers l'extérieur de la conduite. Nous repérons alors le point de passage représentant la plus forte augmentation du gradient suite à un passage par une valeur négative minimum du gradient. Ces quatre points sont mis en mémoire pour chacune des coupes et l'ensemble de ces quadruplets constitue les limites de nos parois internes et externes.

Une fois l'opération terminée, nous constituons quatre listes de pixels :

- La liste des points (pixels) appartenant à la frontière externe de la paroi supérieure de la conduite.
- La liste des points (pixels) appartenant à la frontière interne de la paroi supérieure de la conduite.
- La liste des points (pixels) appartenant à la frontière interne de la paroi inférieure de la conduite.
- La liste des points (pixels) appartenant à la frontière externe de la paroi inférieure de la conduite.

Pour chacune de ces listes de points, une droite de régression est calculée et les points aberrants sont éliminés de nos listes. Un point est considéré comme aberrant s'il s'écarte de la droite de régression d'au moins deux fois la valeur de l'écart type de sa série propre. Les parois d'une conduite non altérée étant parallèles, nous pouvons calculer l'angle de la conduite en utilisant conjointement les informations fournies par chacune des quatre séries de points. En effet, nous savons que pour une régression linéaire simple résolue par la méthode des moindres carrés nous devons trouver les valeurs de m et de b qui minimisent l'équation suivante pour une série de points (x_i, y_i) donnée:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - b - m X_i)^2 \quad (3.2)$$

Pour minimiser cette somme de carrés ses dérivées partielles selon m et b doivent satisfaire les deux contraintes suivantes :

$$\frac{\partial(\sum e_i^2)}{\partial b} = 0 \text{ et } \frac{\partial(\sum e_i^2)}{\partial m} = 0 \quad (3.3)$$

Avec un peu d'algèbre on obtient le résultat suivant :

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.4)$$

$$b = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.5)$$

Dans notre cas nous avons quatre séries de points de la forme $(x_{j,i}, y_{j,i})$ que nous noterons respectivement sous la forme:

série 1: $(x_{1,i}, y_{1,i})$

série 2: $(x_{2,i}, y_{2,i})$

série 3: $(x_{3,i}, y_{3,i})$

série 4: $(x_{4,i}, y_{4,i})$

Nous pourrions résoudre les équations 3.4 et 3.5 pour chacune de ces séries de points indépendamment. Ceci nous donnerait quatre droites de régression distinctes représentant l'orientation de nos parois. Mais dans le cas présent, nous disposons d'une information supplémentaire qui nous permet d'améliorer la précision des résultats obtenus; pour une conduite cylindrique droite les frontières de chacune des parois sont parallèles entre elles. Elles possèdent donc toutes la même pente qui correspond à l'orientation de la conduite. Bien entendu, les ordonnées à l'origine de chacune de ces droites de régressions différeront puisque les différentes frontières ne se superposent pas dans le plan de l'image. Dans le but d'effectuer une meilleure détection de l'orientation des parois de nos conduites, nous avons choisi de combiner nos quatre équations de régression. Ce qui nous mène à une équation pour laquelle nous trouvons une pente m unique qui minimise la somme des erreurs pour les quatre séries de points à la fois. Mais cette équation permet aussi de déterminer les différentes ordonnées à l'origine associées à chacune des quatre séries de points.

Notre somme des carrés à minimiser devient alors :

$$\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{n_j} e_{j,i}^2 = \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{j,i} - b_j - m X_{j,i})^2 \quad (3.6)$$

où,

j est l'indice d'une des quatre séries de points;

i est l'indice d'un point de la série j

Pour minimiser cette équation, ses dérivées partielles selon m et selon b_j (pour j allant de 1 à 4) doivent satisfaire les contraintes suivantes :

$$\frac{\partial \left(\sum_i \sum_j e_{i,j}^2 \right)}{\partial b_j} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial \left(\sum_i \sum_j e_{i,j}^2 \right)}{\partial m} = 0 \quad (3.7)$$

Nous obtenons le système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \\ B_1 & N_1 & 0 & 0 & 0 \\ B_2 & 0 & N_2 & 0 & 0 \\ B_3 & 0 & 0 & N_3 & 0 \\ B_4 & 0 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

où, pour i allant de 1 à 4,

$$A_i = \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^{N_l} x_{i,j}^2 ;$$

$$B_i = \sum_{j=1}^{N_i} x_{i,j} ;$$

$$C = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{N_i} x_{i,j} * y_{i,j} ;$$

$$C_i = \sum_{j=1}^{N_i} y_{i,j} ;$$

où, N_i = Nombre de points de la série i .

Une fois ce système d'équations résolu, nous arriverons à la valeur de la pente recherchée, ainsi qu'aux ordonnées à l'origine associées à chacune des frontières.

À partir de cette dernière étape, nous nous intéresserons aux deux zones d'intérêt représentées par chacune des parois de la conduite, chacune délimitée par sa frontière interne et sa frontière externe, lesquelles sont identifiées par leur droite de régression. La prochaine étape consiste à détecter les puits de corrosion dans ces zones et à estimer les épaisseurs locales des parois.

3.5 Détection des puits de corrosion sur les parois

Tel que présenté au chapitre un, la détérioration des conduites par piqûration provoque une perte locale de matériel. Les zones ayant subi une perte de matériel atténuent moins le rayonnement ionisant les traversant que les zones avoisinantes de même épaisseur nominale qui n'ont pas subi de détérioration par la corrosion. Si on néglige les effets dus à une illumination non uniforme de l'image, on peut faire le postulat suivant : *deux pixels distincts d'une même coupe longitudinale ont le même niveau de gris en l'absence de dégradation*. Dans un tel cas, si on parcourt une coupe longitudinale le long de la conduite, tous les pixels de cette coupe devraient présenter un niveau de gris proche. Cette situation est représentée à la figure 3.10. Pour cet exemple, pour toute séquence de pixels parallèle à la droite « A », les pixels affichent un niveau de gris similaire. Par ailleurs, en présence d'une piqûre de corrosion occupant plusieurs tranches longitudinales contiguës, une diminution de l'intensité des niveaux de gris est apparente sur chacune des tranches de la paroi de la conduite dans les zones corrodées.

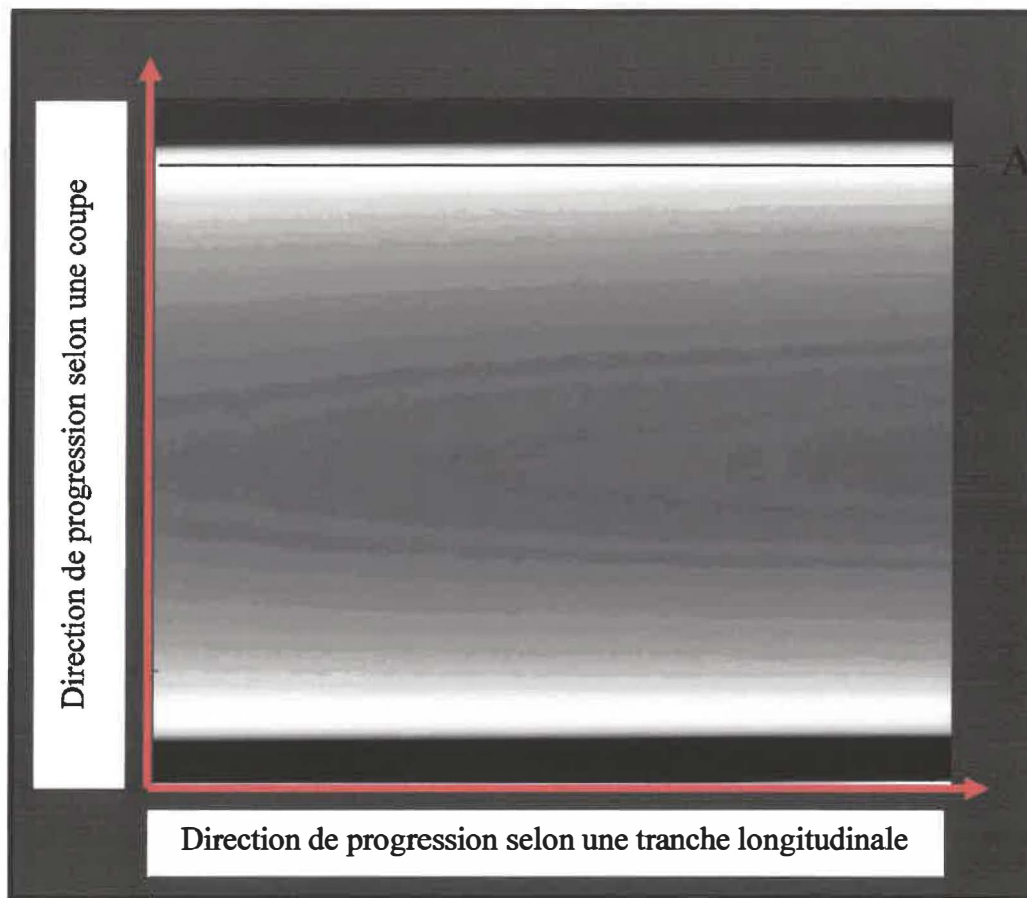


Figure 3.10 : *Présentation d'une tranche longitudinale « A » de la conduite.*

Afin de repérer les piqûres de corrosion, une régression d'ordre deux est effectuée sur les niveaux de gris de chaque tranche longitudinale et les valeurs du modèle de régression sont comparées, pixel par pixel, aux niveaux de gris réels de l'image. Les pixels dont les niveaux de gris réels divergent du modèle de plus de deux unités sont considérés comme étant des pixels appartenant à une piqûre de corrosion. La position de chacun de ces pixels est conservée en mémoire. Des exemples de tranches longitudinales avec leur modèle de régression sont illustrés dans les deux figures suivantes. La figure 3.11 illustre les niveaux de gris rencontrés sur la tranche 'A' de la figure 3.10 (conduite à l'état neuf sans présence de corrosion ou de défauts).

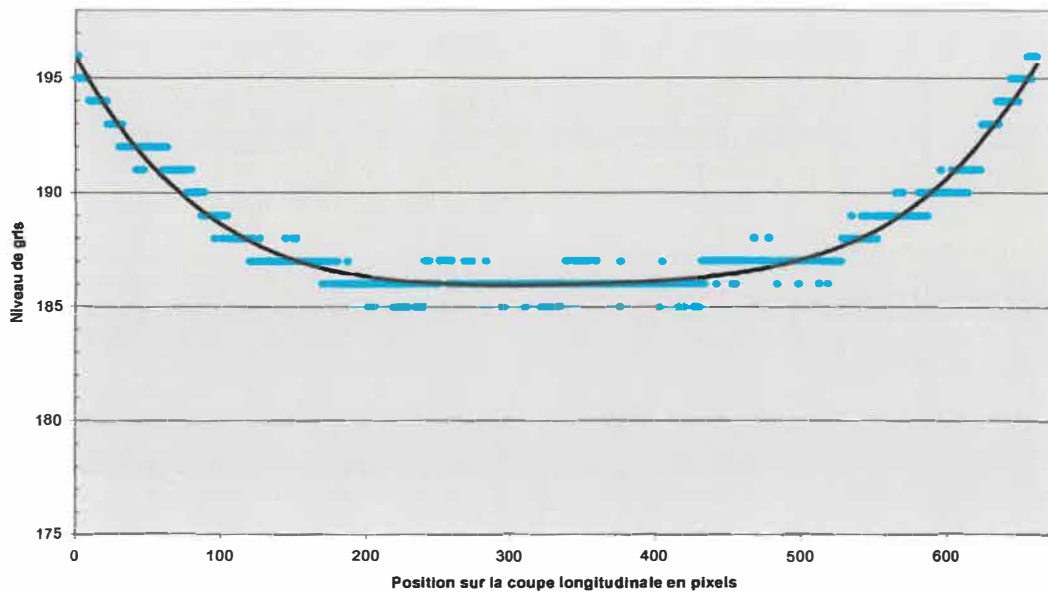


Figure 3.11 : Niveaux de gris d'une tranche longitudinale et son modèle de régression sur une paroi non altérée.

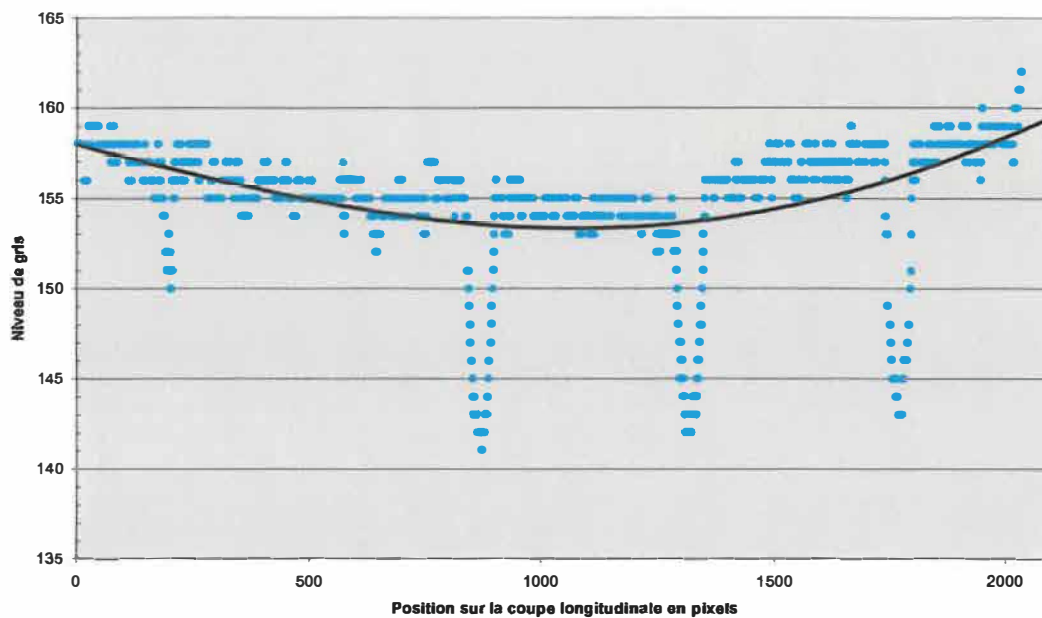


Figure 3.12 : Niveaux de gris d'une tranche longitudinale et modèle de régression provenant de la tranche 'A' de la figure 3.13. Cette paroi présente des piqûres de corrosion simulées.

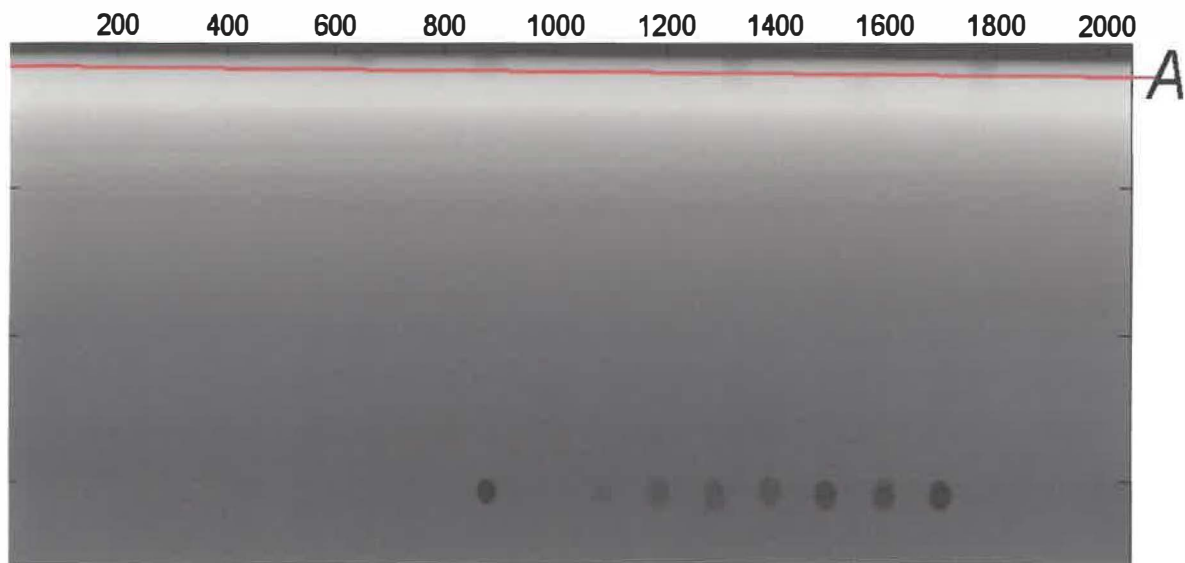


Figure 3.13 : *Tranche longitudinale 'A' qui provient d'une paroi présentant des simulations de piqûres de corrosion.*

Après la localisation des pixels appartenant à des zones de piqûration sur les parois, il faut maintenant déterminer la frontière d'incidence de celles-ci afin de déterminer si nous sommes en présence d'une corrosion interne ou externe sur la conduite. Puisque les conduites inspectées sont des conduites opérationnelles, il est peu probable qu'une piqûre de corrosion traverse complètement une paroi. En effet, une telle fuite serait repérée lors d'une inspection visuelle. De plus, puisque la corrosion est présente à l'interface de deux zones, on conclut que l'incidence des piqûres doit se trouver sur la frontière interne ou la frontière externe de la conduite. Nous associerons à chaque piqûre une frontière d'incidence externe lorsqu'un ou plusieurs points de la zone de piqûration se retrouvent dans un voisinage très rapproché (de l'ordre de 5 pixels) de la frontière externe de la conduite, sinon une piqûre est identifiée comme ayant une frontière d'incidence interne. De façon simple, on pourrait dire que si une perforation est présente à partir de l'intérieur du tuyau, nous aurons une frontière d'incidence interne et si un trou perfore le tuyau par l'extérieur, nous sommes en présence d'une frontière d'incidence externe.

Finalement, si la zone de piqûration est située à l'extérieure de la frontière interne de la paroi, cette dernière n'est pas prise en compte, du moins pour l'instant, dans le cadre de nos travaux.

3.6 Estimation de l'épaisseur des parois

L'épaisseur des parois est estimée pour chacune des parois, de façon individuelle, en repérant les pixels appartenant à une piqûre et cela le long de coupes transversales perpendiculaires à la conduite pour l'ensemble de celle-ci. Dans une première étape, les pixels appartenant à une piqûre de corrosion sont ajoutés à la liste des pixels de la frontière interne ou à la liste des pixels de la frontière externe de la paroi selon la frontière d'incidence de cette piqûre.

Chaque pixel appartenant à la liste des pixels de la frontière interne de la paroi est le point d'origine d'une mesure distincte de l'épaisseur de la paroi. Nous prenons donc une mesure d'épaisseur pour chaque pixel appartenant à la liste des pixels de la frontière interne de la paroi. Pour ce faire, nous nous positionnons sur le $i^{\text{ème}}$ pixel de la liste et nous progressons à travers la paroi, pixel par pixel, dans la direction orthogonale à l'orientation de la conduite afin jusqu'à l'atteinte d'un pixel appartenant à la liste des pixels de la frontière externe de la paroi. Dès que la frontière externe est atteinte, le nombre de pixels parcourus est conservé et indiqué par les coordonnées du pixel de départ de la mesure courante. Ce nombre servira ultérieurement au calcul de l'épaisseur résiduelle de la conduite. Ce calcul sera présenté à la sous-section suivante. La figure 3.14 illustre le parcours des pixels d'une coupe transversale.

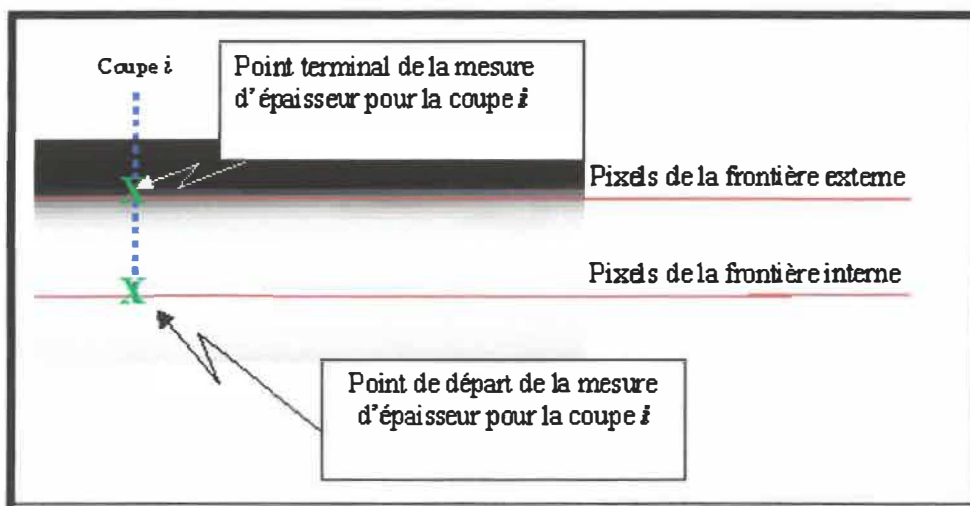


Figure 3.14 : Schéma de la mesure d'épaisseur pour une coupe i d'une paroi de conduite ne présentant aucune piqûre de corrosion.

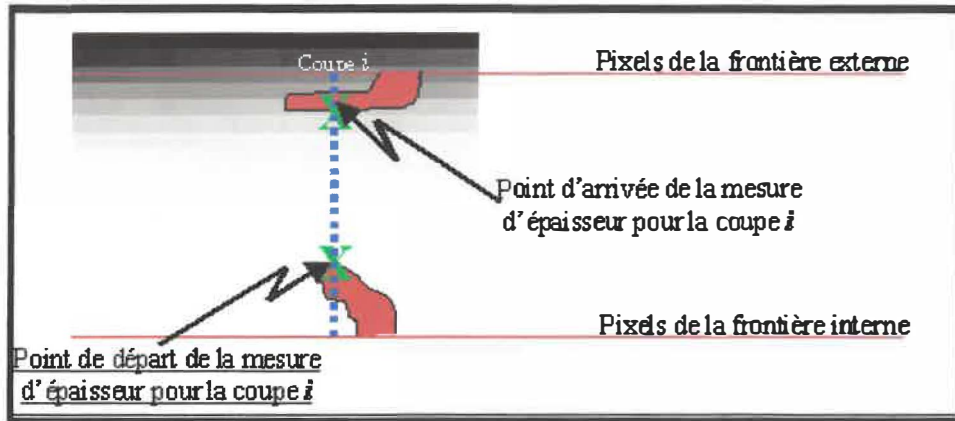


Figure 3.15 : Schéma de mesure d'épaisseur pour une coupe i d'une paroi de conduite présentant deux piqûres de corrosion. Les pixels appartenant aux piqûres de corrosion sont considérés comme des pixels appartenant aux frontières de la paroi.

Un cas particulier est celui d'un nouveau pixel, non encore traité, appartenant à la liste des pixels de la paroi interne situé entre le point de départ et la frontière externe de la paroi. Dans un tel cas, ce pixel de la paroi interne devient un nouveau point de départ à partir duquel nous mesurerons la distance entre les deux frontières de la paroi.

Ce cas est présenté à la figure 3.15. Dans cet exemple, le tracé du parcours de la coupe de la conduite est représenté par une ligne pointillée. On remarque que cette ligne traverse une première piqûre de corrosion au bas de l'image. Tous les pixels de cette piqûre sont considérés, et comptés, comme faisant partie de la frontière interne de la paroi. Le dernier pixel de la piqûre identifié lors du parcours d'une coupe de la conduite est marqué d'un « X » sur l'image. Ce pixel deviendra le point de départ de la mesure d'épaisseur pour cette coupe. Le point d'arrivée (terminal) de la mesure d'épaisseur correspond au premier pixel rencontré sur la piqûre en haut de l'image. Il est représenté par un autre marqueur « X ». Donc, le nombre de pixels parcourus correspondra à la distance (en pixels) entre les deux marqueurs (« X ») sur l'image.

Dès que le nombre de pixels correspondant à l'épaisseur de la paroi est connu pour l'ensemble de toutes les coupes correspondantes aux deux parois de l'image, nous devons convertir ces mesures de chaînes de pixels, prises sur l'image, en dimensions réelles. Cette conversion s'opère en effectuant le quotient entre le nombre de pixels parcourus et

le facteur de résolution de l'image, nous obtenons ainsi l'épaisseur des parois dans des unités de mesure usuelles (mm). Ces mesures sont conservées pour chacune des coupes des deux parois de l'image. Nous pouvons alors calculer le facteur d'agrandissement induit par le processus radiographique tel que décrit au chapitre un. Pour ce faire, nous calculons le quotient entre le diamètre moyen de l'image de la conduite et de diamètre physique moyen de la conduite, lequel est fourni par l'opérateur du système. Le quotient de chacune des mesures de l'image par ce facteur d'agrandissement nous donne la dimension physique réelle associée aux observations.

Une fois tous ces calculs d'épaisseur effectués, un fichier de résultats contient les pixels de départ des coupes des deux parois de l'image, ainsi que les épaisseurs de parois associées. Ce fichier des épaisseurs peut, par la suite, être soumis à différents traitements statistiques afin de préciser l'analyse d'une conduite. En l'occurrence, le niveau de détérioration de la conduite visant à prédire la durée de vie utile des conduites et à planifier la fréquence des inspections. On peut aussi échantillonner un ensemble de conduites d'une même canalisation afin de combiner les informations recueillies et ainsi obtenir des estimations plus précises par le biais de corrélations.

Chapitre 4

Tests et analyse des résultats

Pour valider nos algorithmes de détection, nous avons conçu un banc d'essais afin de tester différentes conduites et différents états de corrosion. Dans ce contexte, nous avons construit une banque d'échantillons présentant différentes caractéristiques, lesquelles seront présentées ultérieurement dans ce chapitre. Nous avons aussi mis au point un montage permettant un positionnement précis des échantillons en fonction de la source ionisante et du détecteur lors de la prise des clichés radiographiques.

La seconde partie de ce chapitre traite des paramètres utilisés pour l'acquisition des différents clichés radiographiques. Nous terminerons en présentant les résultats obtenus lors de nos essais et en validant ceux-ci en les comparant avec les mesures physiques prises directement sur les conduites et avec des mesures prises sur les films radiographiques par des techniciens expérimentés.

4.1 Description de la base de données

Notre échantillon de tests est restreint aux conduites tubulaires droites pour lesquelles notre système de détection automatique a été conçu. Trois types de conduites sont représentés dans la base de données :

- Des conduites neuves sans corrosion contenant des défauts usinés;
- Des conduites corrodées en laboratoire à l'aide de solutions acides;
- Des conduites de canalisations industrielles en service.

Les premières images proviennent d'échantillons de conduites avec ces défauts usinés. Cinq types de défauts ont été reproduits dans nos échantillons :

- des sillons circonférentiels internes;
- des sillons circonférentiels externes (figure 4.1, sillon 2) ;
- des soudures circonférentielles (figure 4.2) ;
- des trous à fond plats ou coniques internes (figure 4.3) ;
- des trous à fond plats ou coniques externes (figure 4.4) .

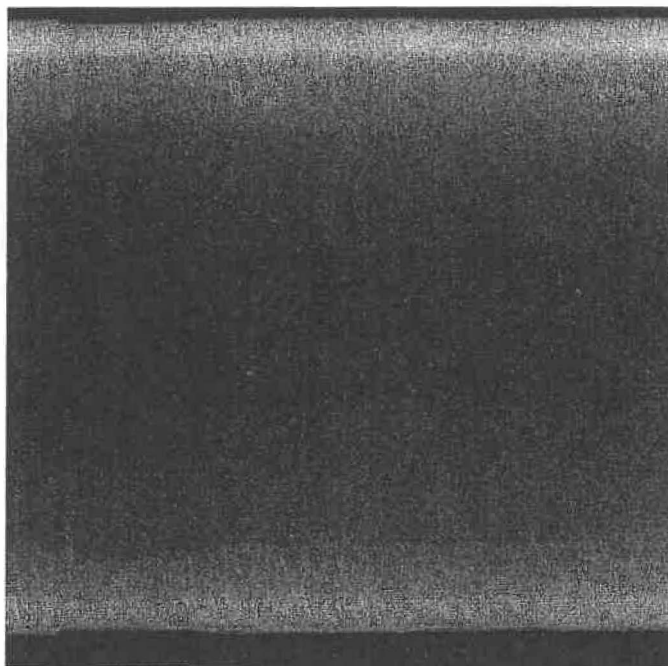


Figure 4.1 : Radiographie d'une conduite avec deux sillons circonférentiels externes.



Figure 4.2 : Radiographie d'une conduite présentant une soudure circonférentielle.



Figure 4.3 : Section de conduite présentant des perforations à fond conique sur la surface interne.

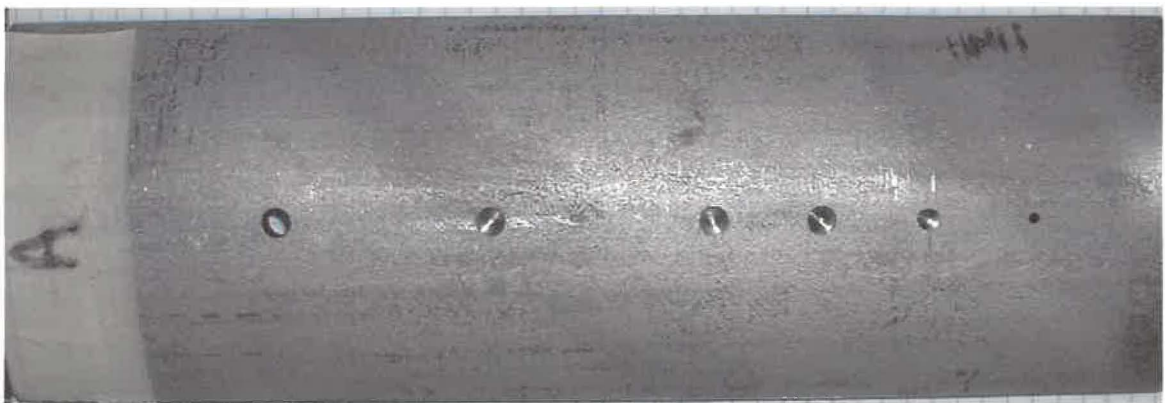


Figure 4.4 : Section de conduite présentant des perforations à fond conique sur la surface externe.

Les sillons circonférentiels illustrent, de façon grossière, la présence de corrosion uniforme et ils ont une largeur de 2,5 cm. Ces échantillons ont été usinés dans une conduite d'acier doux ne comportant pas de corrosion visible. Nous avons utilisé ce type d'échantillons pour tester la capacité de nos algorithmes de détection des parois à s'adapter à de brusques variations de l'épaisseur d'une conduite. Et ce, tant pour une diminution de l'épaisseur à partir de la paroi externe (sillons circonférentiels externes) que pour une diminution de l'épaisseur à partir de la paroi interne (sillons circonférentiels internes) de la conduite. Des clichés de conduites présentant des soudures circonférentielles ont aussi été analysés afin de valider le comportement de nos algorithmes en présence de changements graduels d'épaisseurs. Dans ce cas, plusieurs diamètres de conduites, variant de 7,5 cm à 15 cm, et plusieurs épaisseurs nominales de parois allant de 3 mm à 6 mm ont été testés pour s'assurer que nos conclusions s'appliquent bien à tous les types de conduites visés par le système de détection développé dans le cadre de ces travaux.

Des échantillons d'acier galvanisé ont aussi été utilisés pour représenter des piqûres de corrosion simples. Nous avons effectué des perforations de différents diamètres et de différentes profondeurs sur ces échantillons. Les perforations ont été faites dans un axe radial sur les parois internes et externes de la conduite pour représenter respectivement des piqûres internes et externes.

Ces échantillons nous permettent de mesurer la précision de notre système lors du repérage des piqûres de corrosion et aussi de comparer la précision des mesures effectuées par le système de détection automatique avec celles effectuées à l'aide des méthodes de prises de mesures conventionnelles.

Les échantillons corrodés en laboratoire nous auront permis de valider notre système en présence de corrosions réelles. Finalement, les clichés saisis sur des canalisations industrielles en service ont permis de faire des comparaisons entre les mesures prises par les méthodes conventionnelles et celles prises par notre système dans un environnement de travail réel.

Cette dernière étape est importante puisque la prise de clichés sur des conduites en service comporte des particularités dues à différents facteurs difficiles à reproduire en laboratoire. En l'occurrence :

- Image bruitée suite à un rayonnement réfléchi aléatoirement par l'environnement externe de la conduite ;
- présence de produit de corrosion à l'intérieur et sur la surface des conduites qui atténue le contraste produit par les défauts de la conduite ;
- présence de dépôts de résidus dans les conduites et superposition d'artefacts aux images obtenues.

Les caractéristiques précises de différents clichés utilisés dans nos tests sont décrites à l'annexe A.

4.2 Description du banc d'essai

Dans le cadre de ce projet, nous avons développé un montage mécanique, présenté à la figure 4.5, qui a pour but de positionner avec précision la cible à radiographier, la source de rayonnement et le détecteur lors de la prise des clichés radiographiques.

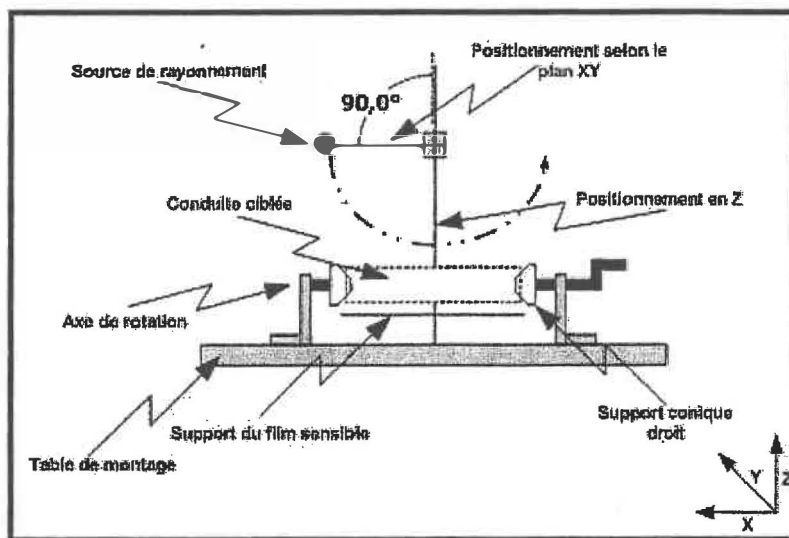


Figure 4.5 : Description du montage utilisé pour l'acquisition des clichés radiographiques de conduites cylindriques.

Lors de l'utilisation de ce montage, la table (base) du montage doit être parfaitement horizontale (au niveau) et elle définit le plan des axes x et y du banc d'essai. Des cônes sont insérés fermement à chacun des bouts de la conduite ce qui permet de la supporter de façon centrée par rapport à son axe longitudinal. La conduite peut ensuite être pivotée sur cet axe pour exposer la section de paroi désirée. Afin de reproduire la saisie d'un cliché, les angles d'une conduite ayant fait l'objet d'une projection radiographique sont identifiés à l'aide d'un burin sur chacun des échantillons.

Une fois la conduite positionnée sur le banc d'essai, le détecteur est positionné sous la conduite à l'aide d'une plate-forme parallèle à la table du montage. Le film et les écrans sont déposés sur cette plate-forme. Ensuite, la plate-forme est déplacée sur un axe vertical de telle façon que la partie centrale du détecteur est en contact avec la conduite. La dernière étape consiste à positionner le collimateur qui recevra la source de rayonnement. Le collimateur est fixé à une extrémité d'une tige centrée par rapport à la longueur de la conduite. Cette tige peut être ajustée verticalement et positionnée selon la largeur de la conduite à l'aide de pièces d'ajustement prévues à cet effet.

En résumé, le montage permet de positionner avec précision la source par rapport à la conduite selon les axes x , y et z (direction normale à la base) et de contrôler l'angle de la conduite de telle façon que la section de la paroi de la conduite désirée soit projetée orthogonalement sur le détecteur.

4.3 Description des paramètres radiographiques

Tous les clichés de notre échantillonnage ont été exposés à des sources de rayonnement d'iridium 192. Ces sources sont cylindriques et elles ont 3 mm de diamètre par 2,5 mm de hauteur. La distance source-film utilisée était déterminée selon plusieurs facteurs, en l'occurrence, le temps disponible, le matériau de la cible (conduite) et la puissance de la source. En fait, pour chacune des saisies, nous avons utilisé la plus grande distance source-film nous permettant d'obtenir une densité d'image standard (voir chapitre 1) en moins de dix minutes d'exposition. Nous nous sommes limités à des expositions de dix minutes étant donnée la quantité élevée de clichés à saisir à chaque séance de saisie ainsi

qu'à des contraintes de temps d'accès aux laboratoires de radiographie et de main d'œuvre spécialisée nécessaire à la saisie. La méthode de calcul des temps d'exposition a été présentée au chapitre 1 de ce mémoire. Toutefois, la distance source-film utilisée est toujours supérieure à 5 fois le diamètre externe de la conduite, de façon à réduire suffisamment le flou géométrique apparent sur les images. Nous avons utilisé trois types de films sensibles ; le Fuji 50, le Fuji 80 et le Fuji 100. Les différences entre ces films ont été présentées au chapitre 1. Il faut cependant préciser que l'utilisation du film Fuji 50 a été privilégiée lors de la saisie de nos échantillons. Ce choix tient compte de la haute définition des images radiographiques, et donc une plus grande précision est obtenue à l'aide de ces pellicules. Finalement, pour chacun des clichés réalisés dans le but d'effectuer des mesures d'épaisseur, nous avons utilisé une source centrée selon la longueur et la largeur de la cible.

Les caractéristiques de différents clichés utilisés dans nos tests sont décrites sous forme de tableaux à l'annexe A.

4.4 Validation des résultats

4.4.1 Détection des contours

Afin de vérifier le bon fonctionnement des algorithmes de détection des contours de parois mis au point, nous avons, dans un premier temps, validé les résultats de détection visuellement sur plusieurs clichés radiographiques (en niveaux de gris). Notre logiciel affiche en rouge les pixels identifiés par le système comme faisant partie des frontières internes et externes des parois, ce qui nous permet d'avoir une validation visuelle des frontières détectées par le système automatique. Nos observations confirment la précision souhaitée de la détection des frontières sur des conduites non altérées, sur des conduites présentant des soudures circonférentielles et sur une conduite ayant des sillons circonférentiels interne et externe.

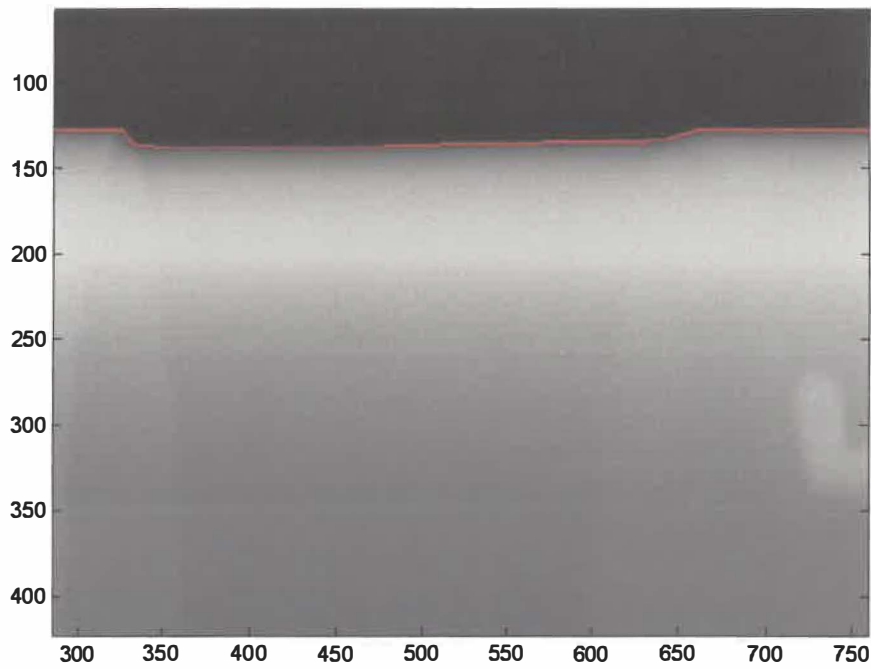


Figure 4.6 : Validation de la détection de la paroi externe pour une conduite avec un sillon externe. Les pixels rouges représentent la frontière externe de la conduite détectée par notre système.

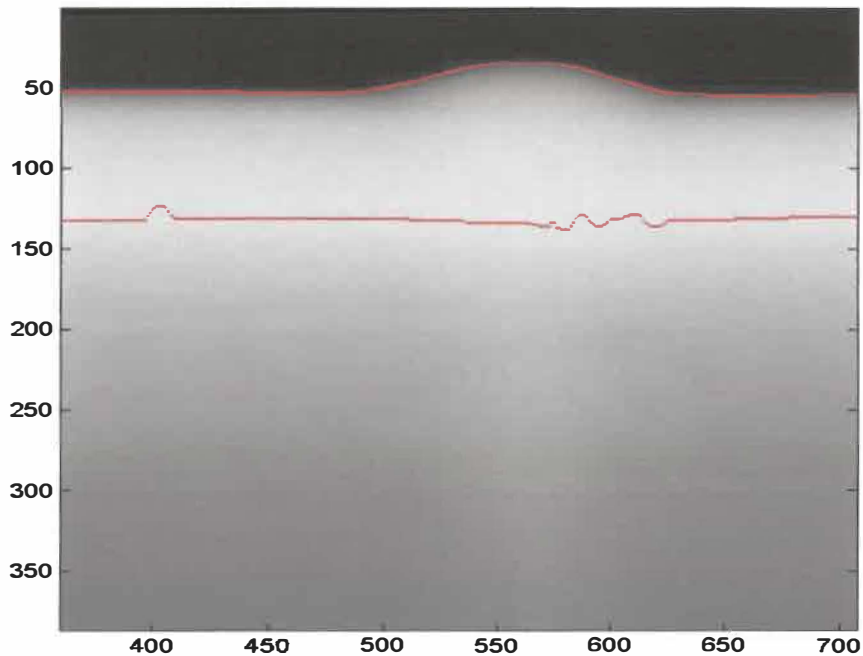


Figure 4.7 : Validation de la détection des frontières interne et externe pour une paroi de conduite avec une soudure. Les pixels rouges représentent les frontières de la paroi détectées par notre système.

Afin de nous assurer de la localisation cohérente des pixels des frontières des parois, nous avons choisi aléatoirement cinquante profils radiographiques à partir de dix clichés de différentes conduites. Pour chacun de ces profils, nous nous sommes assurés que la position des pixels identifiés, par le système de reconnaissance automatique, comme étant des pixels frontières correspondait bien à la position réelle de la frontière. Les clichés utilisés présentaient les caractéristiques suivantes :

1. conduite sans corrosion avec une épaisseur nominale de 64 mm et un diamètre externe de 7,62 cm ;
2. conduite sans corrosion avec une épaisseur nominale de 64 mm et un diamètre externe de 12,7 cm;
3. conduite avec une soudure circonférentielle ;
4. conduite usinée avec des sillons circonférentiels internes et externes ;
5. conduite industrielle avec corrosion externe et corrosion interne.

Des cinquante profils analysés, seulement deux profils, lesquels provenaient des échantillons de conduites industrielles, présentaient des erreurs de localisation de la frontière interne. Ces erreurs sont provoquées par la présence de bruit blanc dans le voisinage de la paroi car l'algorithme de détection recherche le point correspondant à un maximum de luminance local. Cette situation est illustrée à la figure suivante.

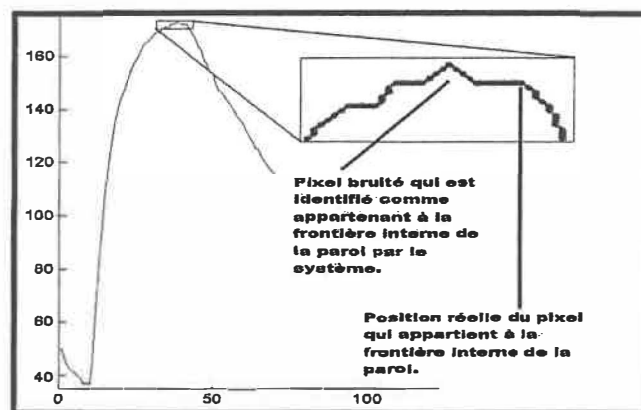


Figure 4.8 : Localisation erronée de la position de la frontière interne d'une paroi sur un profil de conduite. Cette erreur est due à la présence d'un pixel bruité sur l'image. La courbe représente le niveau de gris des pixels en fonction de la position des pixels le long d'une coupe transversale.

4.4.2 Détection des piqûres

Afin de valider notre algorithme de détection des piqûres, nous avons utilisé plusieurs échantillons, dont les caractéristiques sont données dans l'annexe A, soit les échantillons A, B et B7.

Ces échantillons ont été perforés à l'aide de forets de diamètres différents. Un exemple d'échantillon est illustré à la figure suivante. Le plus petit diamètre identifiable par notre système de détection est de 2 mm, soit un millimètre de moins que l'œil humain sur des images sans agrandissement.

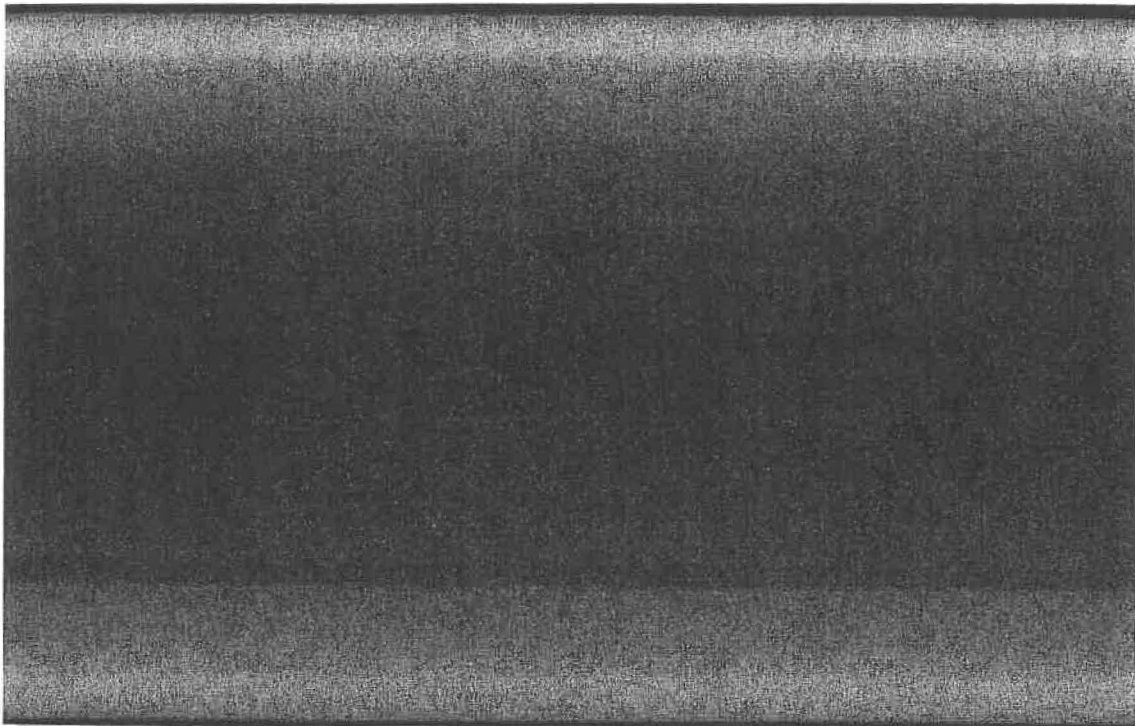


Figure 4.9 : Échantillon 'B' qui contient des perforations internes et externes visibles sur le fond de la conduite et sur la paroi supérieure.

Dans le cadre de ces tests, nous avons repéré visuellement chacune des piqûres artificielles présentes sur des agrandissements de nos images. La position et le diamètre relatif de chacune de celles-ci ont ensuite été relevés et comparés aux données obtenues avec le système de détection automatique.

Pour chacun des échantillons analysés, toutes les piqûres d'un diamètre de 2 mm et plus ont été repérées avec une incertitude moyenne de l'ordre de deux à quatre pixels en deçà du diamètre réel de la piqûre.

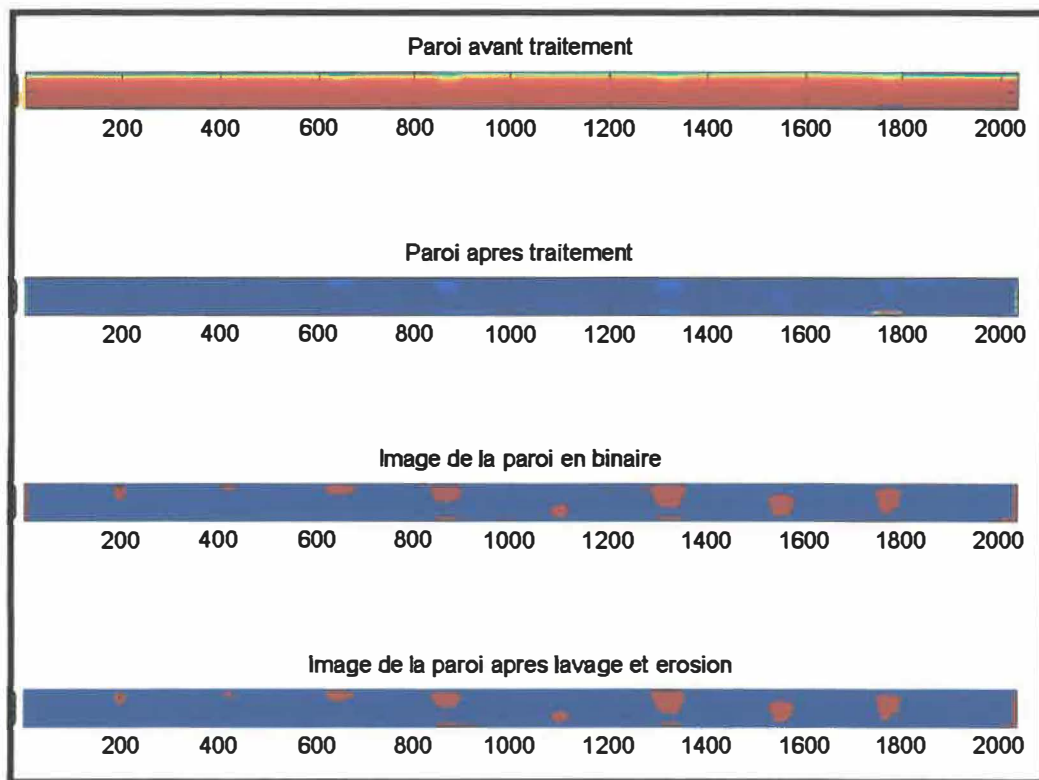


Figure 4.10 : Schéma de détection des piqûres de corrosion présentes sur une paroi de conduite. La paroi de la conduite est représentée par un rectangle bleu et les sections en rouge représentent les piqûres de corrosion détectées. Dans ce cas particulier, toutes les piqûres présentes sur l'échantillon sont représentées.

4.4.3 Mesures d'épaisseur

Finalement, dans le but de vérifier la précision des calculs automatisés d'épaisseurs des parois, nous avons comparé, pour un sous-ensemble de nos échantillons, les mesures prises par le système à celles prises par des techniciens expérimentés sur les pellicules radiographiques référencées par les mesures physiques des conduites. Trois types de mesures ont été comparés :

- l'épaisseur maximale de la paroi ;
- l'épaisseur minimale de la paroi ;
- l'épaisseur moyenne de la paroi.

Plusieurs types de conduites ont été utilisés dans le but de valider nos calculs dans les différentes conditions d'utilisation rencontrées. Nous avons utilisé deux échantillons usinés, un échantillon corrodé en laboratoire et une image provenant d'une conduite industrielle en service. Pour toutes ces analyses, nous avons utilisé un seuil de segmentation déterminé automatiquement par le système.

Le tableau suivant présente les mesures d'épaisseur calculées automatiquement et celles obtenues manuellement par un technicien expérimenté. Dans trois cas sur quatre, il a été possible de comparer ces mesures avec des mesures physiques prises directement sur les conduites à l'aide d'un pied à coulisse et d'une jauge de profondeur. Les mesures d'épaisseur moyennes présentées dans la deuxième et la troisième colonne du tableau II correspondent respectivement à l'épaisseur nominale de la conduite mesurée et à l'épaisseur réelle. Dans la première colonne, on retrouve la moyenne arithmétique des épaisseurs prises sur l'ensemble de la conduite, le nombre de mesures variant de 3 000 à 10 000 données selon la longueur de l'échantillon de conduite à analyser.

Tableau II

Comparaison entre les mesures d'épaisseur du système, les mesures prises par un technicien expérimenté et les mesures physiques de différents échantillons.

	Mesures prises par notre outil automatisé	Mesures prises par un technicien	Mesures physiques
Échantillon S1			
Épaisseur moyenne	0,53 cm	0,60 cm	0,60 cm
Minimum & Maximum	0,42 cm & 0,59 cm	0,52 cm & 0,63 cm	0,48 cm & 0,64 cm
Échantillon B7			
Épaisseur moyenne	0,52 cm	0,62 cm	0,61 cm
Minimum & Maximum	0,13 cm & 0,61 cm	0,18 cm & 0,63 cm	0,21 cm & 0,64 cm
Échantillon T1			
Épaisseur moyenne	0,50 cm	0,55 cm	-----
Minimum & Maximum	0,36 cm & 0,74 cm	0,46 cm & 0,80 cm	0,40 cm & 0,75 cm
Échantillon SP1			
Épaisseur moyenne	0,47 cm	0,60 cm	INCONNU
Minimum & Maximum	0,25 cm & 0,55 cm	0,36 cm & 0,68 cm	

Les mesures du tableau II ont été prises sur quatre échantillons ayant les caractéristiques suivantes:

- Conduite usinée sans corrosion avec deux sillons circonférentiels internes et deux sillons circonférentiels externe (Échantillon S1);
- Conduite usinée sans corrosion avec perforations à fonds plats interne de 3,5 mm de diamètre. (Échantillon B7);
- Conduite présentant de la corrosion interne produite en laboratoire à l'aide d'une solution acide (Échantillon T1);
- Conduite industrielle avec de la corrosion interne et externe (Échantillon SP1).

Chapitre 5

Discussion et conclusion

5.1 Analyse des résultats

À la lumière des résultats présentés au tableau II du chapitre précédent, on constate que les mesures prises par le système de détection automatique sont systématiquement inférieures aux mesures réelles des échantillons. Nous croyons que cette situation se généralisera à l'ensemble des conduites que nous serions amenés à analyser. En fait, la proportion entre l'épaisseur nominale d'une paroi de conduite et le diamètre externe de la conduite n'est pas la même selon que cette épaisseur est mesurée directement sur l'échantillon physique ou qu'elle est mesurée sur une image radiographique. La valeur mesurée sur les projections radiographiques est approximativement inférieure de 10 % à 12 % de l'échantillon physique. Cette différence conduit à une incertitude additionnelle dans nos calculs. Elle est due à une surexposition de la frontière externe des parois de la conduite. Cette surexposition brûle en totalité le film sur une petite partie de la paroi de la conduite, laquelle n'est pas d'une assez grande densité pour atténuer suffisamment le rayonnement pour être visible sur les films sensibles. À la figure 5.1, la section de paroi située au dessus du rayon schématisé a une épaisseur inférieur à deux fois l'épaisseur nominale de la conduite. Avec une exposition normale, cette épaisseur est insuffisante pour protéger le film sensible d'une surexposition. La section de film sensible située sous la projection de cette petite partie de la paroi est donc complètement brûlée par le rayonnement ionisant.

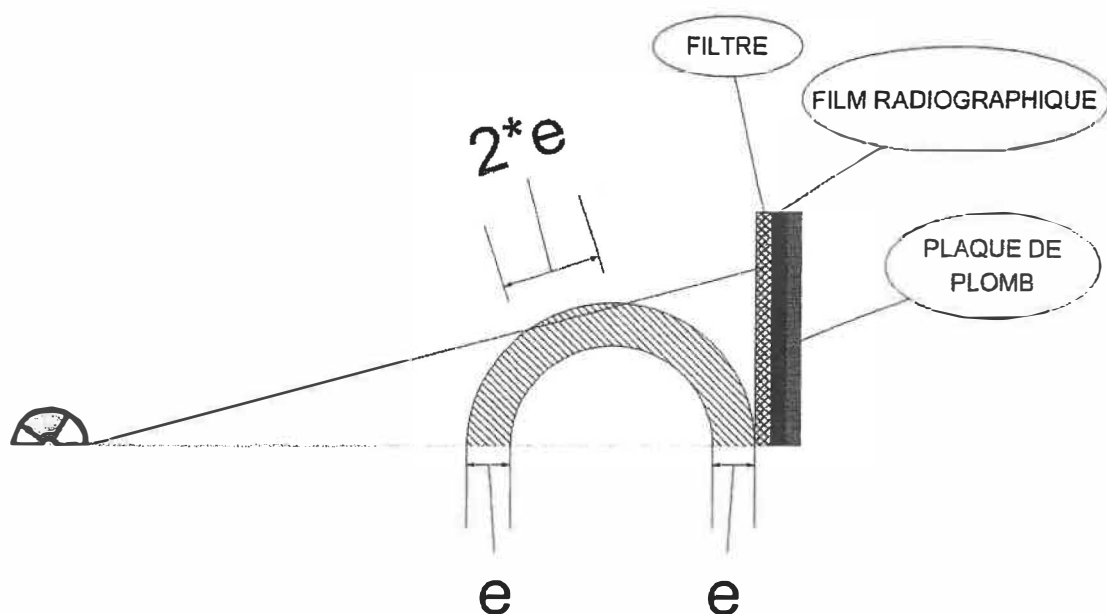


Figure 5.1 : Section de paroi surexposée.

Cette incertitude pose deux problèmes. Premièrement, il en résulte une légère sous-évaluation de l'épaisseur des parois par le système automatique. En contrepartie, puisque nous utilisons la mesure du diamètre externe de la conduite pour calculer le facteur de correction associé à nos conduites et que le diamètre externe est sous-évalué, nous avons comme conséquence une surévaluation du facteur de correction calculé par le système.

Signalons tout de même que les incertitudes occasionnées par une surexposition des frontières externes des parois demeurent acceptables dans le cadre de notre projet, car elles sont inférieures à 1 mm. Ces incertitudes entraînent une sous-estimation de l'épaisseur des parois et donc à une approche plus sécuritaire de l'état des conduites que ne l'aurait été une analyse visuelle et manuelle standard.

Une autre observation importante se dégage des résultats du tableau II. On constate que les mesures d'épaisseur moyennes prises par les techniciens sont plus près des mesures réelles que ne le sont celles prises par le système de détection développé. Suite à des échanges avec les techniciens expérimentés, nous en sommes venus à la conclusion que l'œil humain localise la frontière interne des parois des conduites dans la zone où le gradient des niveaux de gris est le plus élevé plutôt qu'à la position du maximum de luminance local sur la paroi. La position de la frontière perçue par les techniciens comme

étant la frontière interne de la paroi est donc légèrement plus à l'intérieur de la conduite qu'elle ne l'est réellement. Le diagramme suivant illustre ce phénomène.

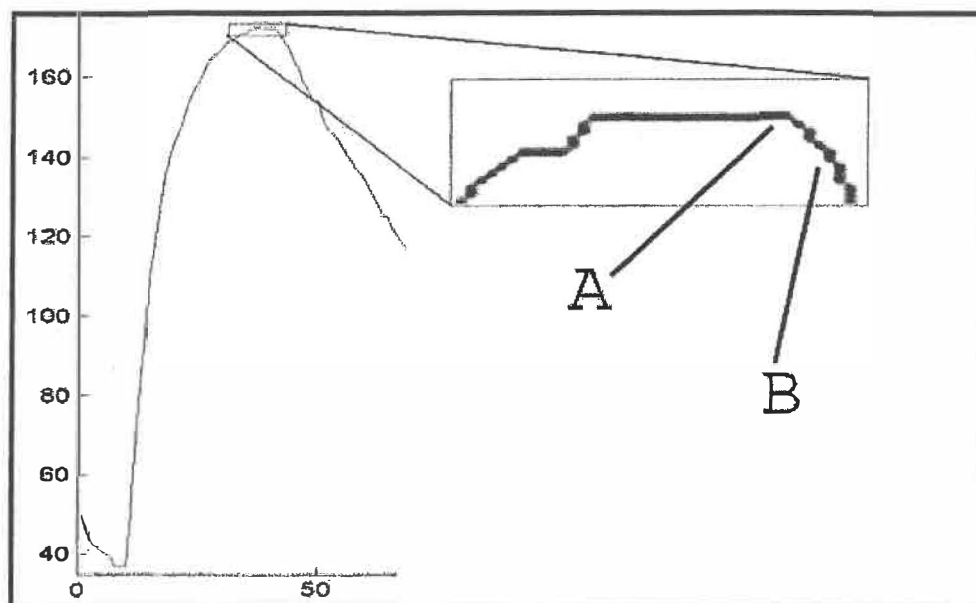


Figure 5.2 : Profil des niveaux de gris sur une coupe de paroi. Le point 'A' représente le maximum de luminance local (frontière interne réelle). Le point 'B' représente la zone de forte variation du niveau de gris repéré par les techniciens comme étant la frontière interne de la paroi.

On note aussi une différence de 0,02 à 0,13 cm entre les résultats obtenus par le système de détection et ceux obtenus par nos techniciens. Ceci nous semble une bonne adéquation entre les résultats comparatifs sachant que l'interprétation de l'œil humain conduit à une divergence moyenne dans les prises de mesures d'environ 7 %, soit 0,04 cm pour une conduite d'une épaisseur nominale de 0,65 cm.

Finalement, les plus grandes différences entre les données calculées automatiquement et celles des techniciens proviennent de la dernière conduite présentée au tableau 4.1. Cette conduite (la radiographie) est une conduite opérationnelle dont la radiographie a été prise dans un environnement bruyé. La faible qualité de cette image rend donc son analyse plus difficile par notre système ainsi que pour les techniciens. Pour ajouter aux difficultés rencontrées, dans ce cas particulier, la conduite présente un stade très avancé de corrosion externe, ce qui ajoute beaucoup d'incertitude dans les calculs du facteur de correction applicable à cette image.

5.2 Discussion sur l'approche méthodologique

L'approche proposée dans ce mémoire a été développée dans le but de mesurer rapidement l'épaisseur résiduelle des parois de conduites sur des projections radiographiques tangentielles. Cette méthode possède plusieurs avantages par rapport aux mesures traditionnelles prises par les techniciens. Premièrement, les mesures d'épaisseur du système peuvent être prises pour chaque colonne de pixels de l'image, soit approximativement 200 mesures par pouce linéaire de paroi, en un temps de l'ordre de cinq secondes par pouce d'image à analyser. De plus, les mesures prises par les techniciens sont sujettes à interprétation et dépendent de l'efficacité de l'œil humain, ce dont l'application informatique est exempte et pour laquelle les résultats demeurent constants pour l'ensemble des analyses séquentielles d'une même image. Précisons aussi, que notre système est plus sensible que l'œil humain lors de la détection de petites piqûres de corrosion, lesquelles influencent peu le niveau de gris moyen de la zone atteinte par la corrosion.

Ajoutons que le système proposé ne nécessite aucun processus de calibration et s'adapte efficacement à la majorité des types de conduites cylindriques rencontrés dans l'industrie, ce qui n'est pas le cas des systèmes de mesures par densité de film.

Par contre, contrairement aux méthodes d'analyse par densité de film, notre système ne permet pas actuellement de prendre des mesures du fond des conduites ou encore d'effectuer des analyses de conduites ayant des géométries complexes tels des coudes, des jonctions en 'T' ou des valves. Cependant, nous croyons que l'approche proposée est facilement adaptable dans son ensemble à ces cas de géométries.

5.3 Améliorations et travaux futurs

Afin d'améliorer la précision des mesures du système proposé, il serait intéressant de calculer la proportion de paroi surexposée, c'est-à-dire la proportion de paroi n'atténuant pas suffisamment les rayons ionisants pour être visible sur les clichés radiographiques. Le calcul du facteur d'agrandissement de l'image à l'aide d'un étalon suffisamment dense pour ne pas être disproportionné par le phénomène de surexposition lors des projections radiographiques fournirait un degré de précision supplémentaire. De plus, cette dernière technique permettrait d'obtenir des mesures du facteur d'agrandissement qui ne seraient pas influencées par les caractéristiques physiques ou l'état des conduites analysées.

Pour les besoins de l'industrie, l'ajout de fonctionnalités à notre système, tels que la prise en charge de l'analyse de conduites courbes ou même de formes plus complexes telle que des conduites en forme de «T» ou de «Y» seraient pertinentes, car ces géométries sont rencontrées sur les réseaux de conduites industrielles. L'analyse des clichés de conduites munies de gaine isolante serait aussi intéressante pour l'industrie. Ces options d'analyses élimineraient l'opération longue et coûteuse du retrait de l'isolant sur les sections de conduites à radiographier lors des opérations de saisie d'images.

Une analyse de la texture du fond des images des conduites nous permettrait aussi d'extraire certaines informations sur l'état général de la conduite. Il serait possible, par le biais de rotations sur le banc d'essais de corréler les analyses sur les bords (frontières) avec l'analyse des textures de fond. Ce qui pourrait éventuellement nous apporter plus d'informations sur le type et l'ampleur de la corrosion dans les conduites analysées.

L'utilisation d'un détecteur de rayonnement numérique pour remplacer les films sensibles nous permettrait d'éliminer la surexposition en combinant les informations extraites de plusieurs images d'une même scène soumise à des doses de rayonnement croissantes. Cette façon de faire permet d'analyser avec une meilleure précision les zones de moindre densité de la conduite, par exemple le fond de la conduite et la frontière externe des parois, sur les images ayant subi une moins grande exposition au rayonnement gamma.

L'utilisation d'un tel détecteur permettrait aussi l'analyse des zones de plus fortes densités, comme la frontière interne des parois, sur des clichés plus exposés au rayonnement ionisant, ce qui permettrait d'éliminer la contrainte de la latitude des films sensibles expliquée au chapitre un. Nous pourrions détecter de petits défauts localisés dans des sections des conduites généralement sous-exposées ou surexposées lors des prises de radiographie conventionnelles. De plus, cette technique faciliterait les analyses de clichés sur les chantiers industriels et permettrait une meilleure estimation de la taille des échantillons (le nombre de clichés à saisir) sur un réseau opérationnel de conduites.

Par le biais de modèles physiques adéquats, il serait intéressant de calculer précisément l'épaisseur de matériel traversé en fonction de la densité du film sensible. Cette estimation nous permettrait de connaître l'état général de l'ensemble d'une conduite plutôt que d'extraire seulement les mesures d'épaisseur associées aux parois d'une conduite, en tant qu'indicatif de l'état général. Or, cette approche nécessite la mise en place d'une fonction de correction radiométrique permettant de corriger la non-uniformité de l'illumination produite par les sources de rayonnement gamma utilisée dans un contexte de projection tangentielle.

5.4 Conclusion

En conclusion, l'approche automatique développée dans ce mémoire s'avère efficace et plus précise que les techniques d'analyse traditionnelles en ce qui a trait aux mesures d'épaisseur des parois de conduites tubulaires et à la détection des piqûres de corrosion. Nous croyons donc que ce travail initie le développement d'outils d'analyse non destructive radiographique dans le domaine du contrôle de qualité en milieu industriel. Cependant, son utilisation systématique dans le domaine de l'évaluation non destructive appliquée à l'industrie nécessite des améliorations afin de surpasser, et cela sans équivoque, les standards de précision établis pour l'analyse traditionnelle. De plus, les nouvelles versions des systèmes d'analyse d'images radiographiques devront faire leurs preuves sur le plan de la fiabilité et de la stabilité auprès des clients et des techniciens du milieu. Depuis la fin de ce travail de recherche, la compagnie X-Per-X utilise avec succès, en milieu industriel, les programmes informatiques du système de détection automatique développés dans le cadre de ce mémoire.

ANNEXE A

Tableau III

Échantillon B1

Identification de l'échantillon :	B1
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	12,7 cm
Diamètre interne:	11,43 cm
Épaisseur nominale :	6,35 mm
Matériel :	Acier

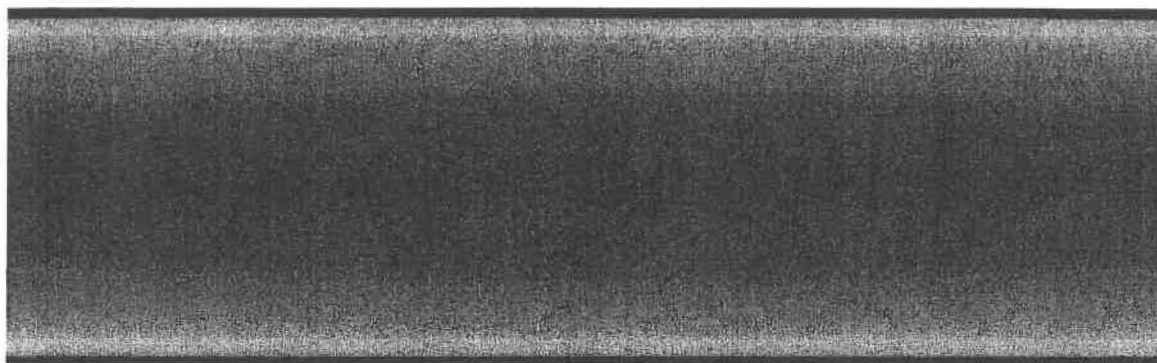


Figure A.1 : Échantillon B1, conduite droite non altérée.

Tableau IV

Échantillon B2

Identification de l'échantillon :	B2
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	12,07 cm
Diamètre interne:	11,43 cm
Épaisseur nominale :	3,2 mm
Matériel :	Acier

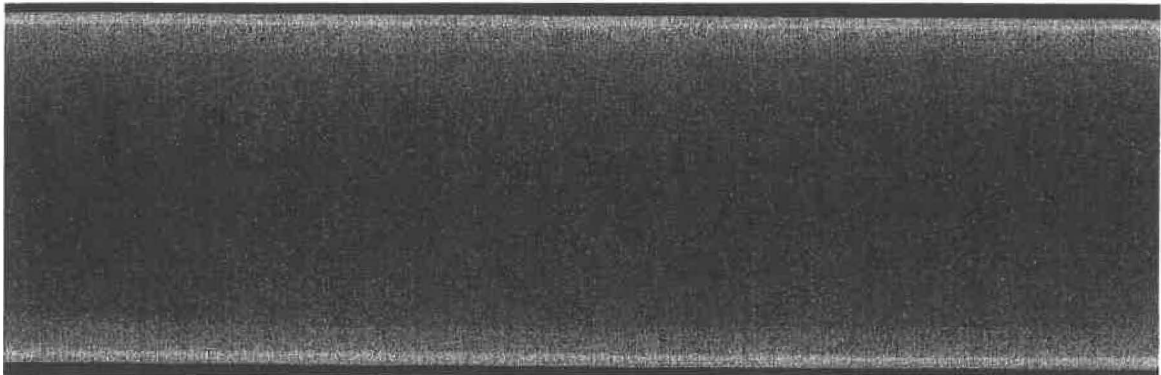


Figure A.2 : Échantillon B2, conduite droite non altérée.

Tableau V

Échantillon B3

Identification de l'échantillon :	B3
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	7,62 cm
Diamètre interne:	6,35 cm
Épaisseur nominale :	6,35 mm
Matériel :	Acier

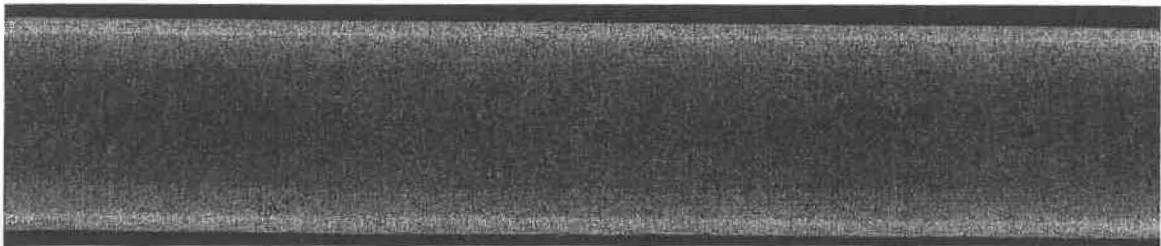


Figure A.3 : Échantillon B3, conduite droite non altérée.

Tableau VI

Échantillon S1

Identification de l'échantillon :	S1
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	11,48 cm
Diamètre interne:	10,18 cm
Épaisseur nominale :	6,5 mm
Matériel :	Acier

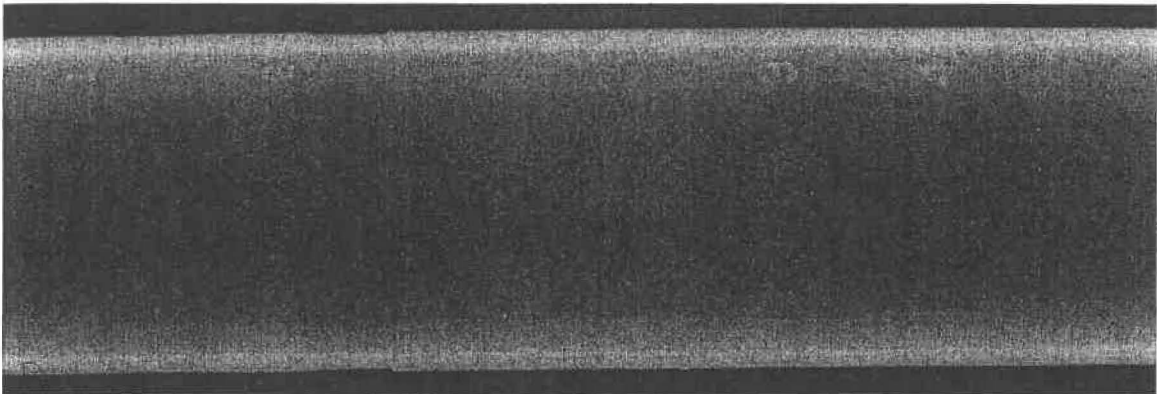


Figure A.4 : Échantillon S1.

Description : Conduite usinée qui présente quatre sillons circonférentiels usinés. Sur cette image, chaque sillon est identifié par un nombre en plomb. La liste suivante donne les caractéristiques de chacun de ces sillons:

1. Sillon externe d'une profondeur de 2,5 mm;
2. Sillon externe d'une profondeur de 5,0 mm;
3. Sillon interne d'une profondeur de 7,6 mm;
4. Sillon interne d'une profondeur de 5,1 mm.

Tableau VII

Échantillon SP1

Identification de l'échantillon :	SP1
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	8,89 cm
Diamètre interne:	7,86 cm
Épaisseur nominale :	5,15 mm
Matériel :	Acier

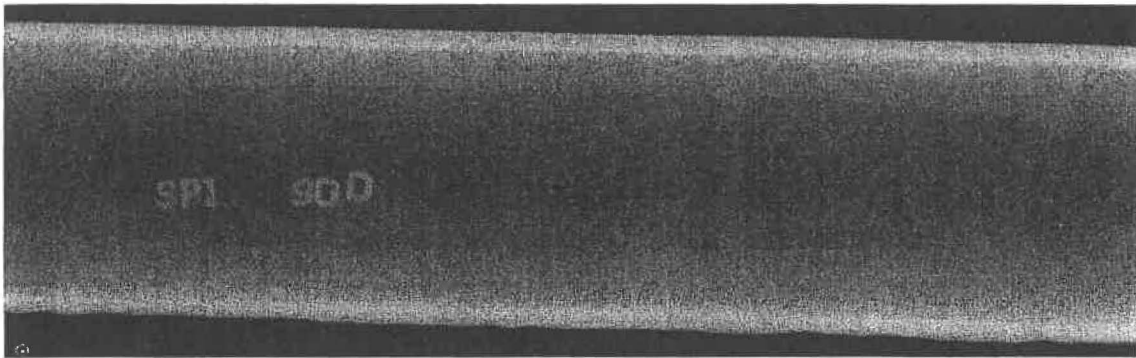


Figure A.5 : Échantillon SP1, conduite industrielle en service. Cette conduite présente une forte corrosion externe de sa paroi inférieure causée par une mauvaise isolation.

Tableau VIII

Échantillon SP5

Identification de l'échantillon :	SP5
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	8,89 cm
Diamètre interne:	7,86 cm
Épaisseur nominale :	5,15 mm
Matériel :	Acier

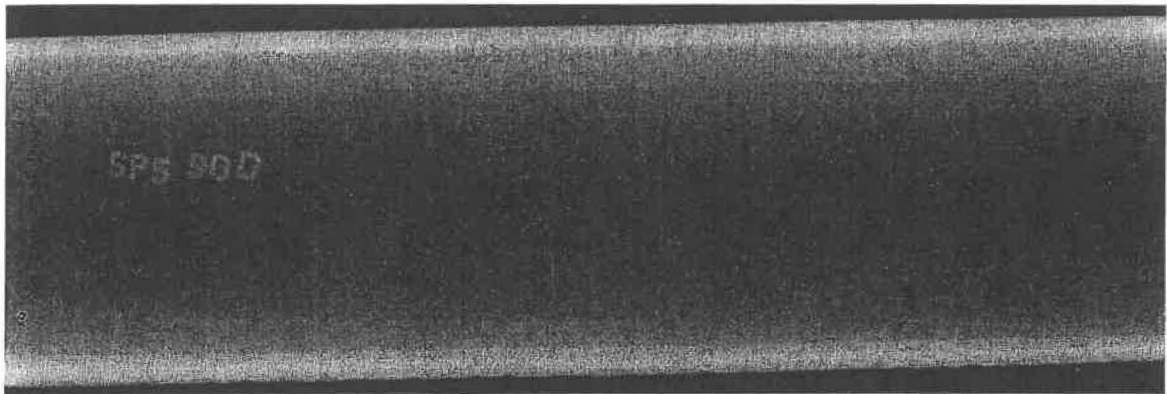


Figure A.6 : Échantillon SP5, conduite industrielle en service. Cette conduite présente une forte corrosion externe et interne de sa paroi inférieure.

Tableau IX

Échantillon B7

Identification de l'échantillon :	B7
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	11,49 cm
Diamètre interne:	10,20 cm
Épaisseur nominale :	6,45 mm
Matériel :	Acier galvanisé

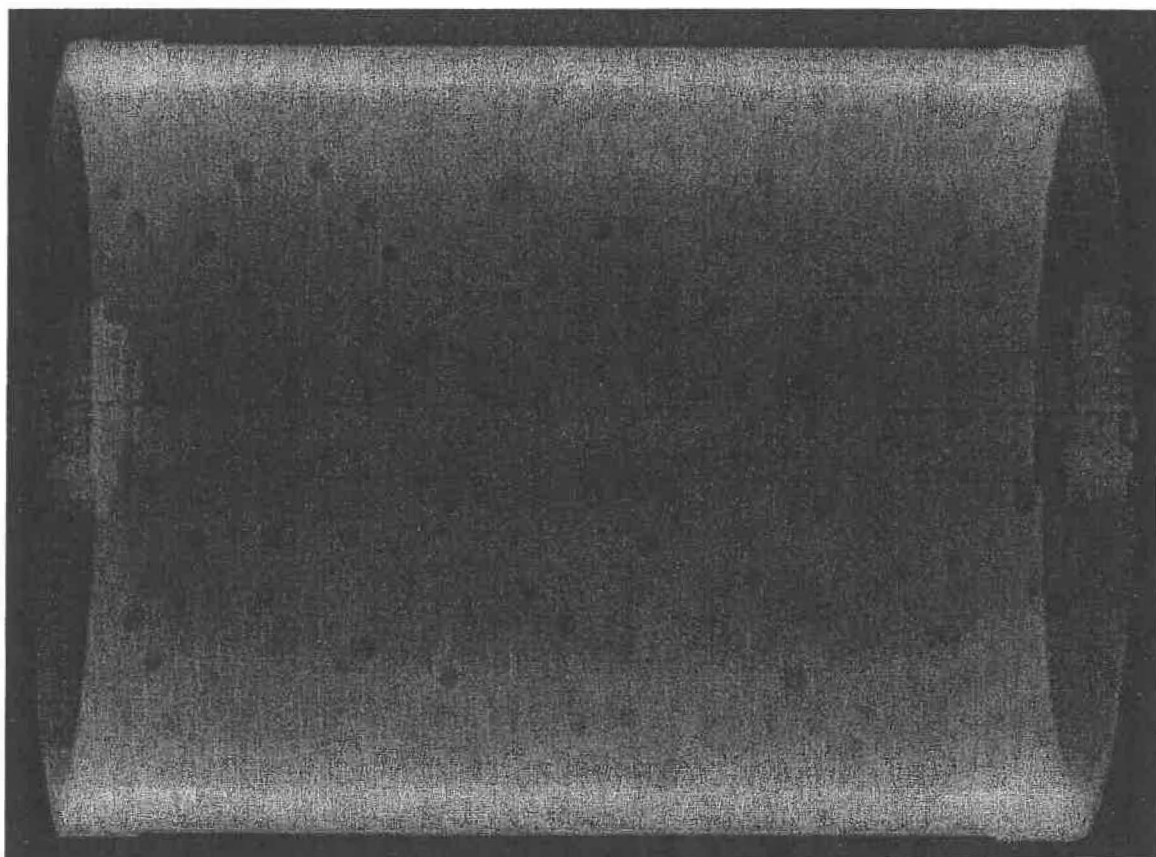


Figure A.7 : Échantillon B7, Conduite usnée qui présente des trous à fond plat perforés aléatoirement sur sa surface interne. Ces perforations ont un diamètre de 3,5 mm et une profondeur de $4,8 \pm 0,1$ mm.

Tableau X

Échantillon A

Identification de l'échantillon :	A
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	11,49 cm
Diamètre interne:	10,20 cm
Épaisseur nominale :	6,45 mm
Matériel :	Acier galvanisé

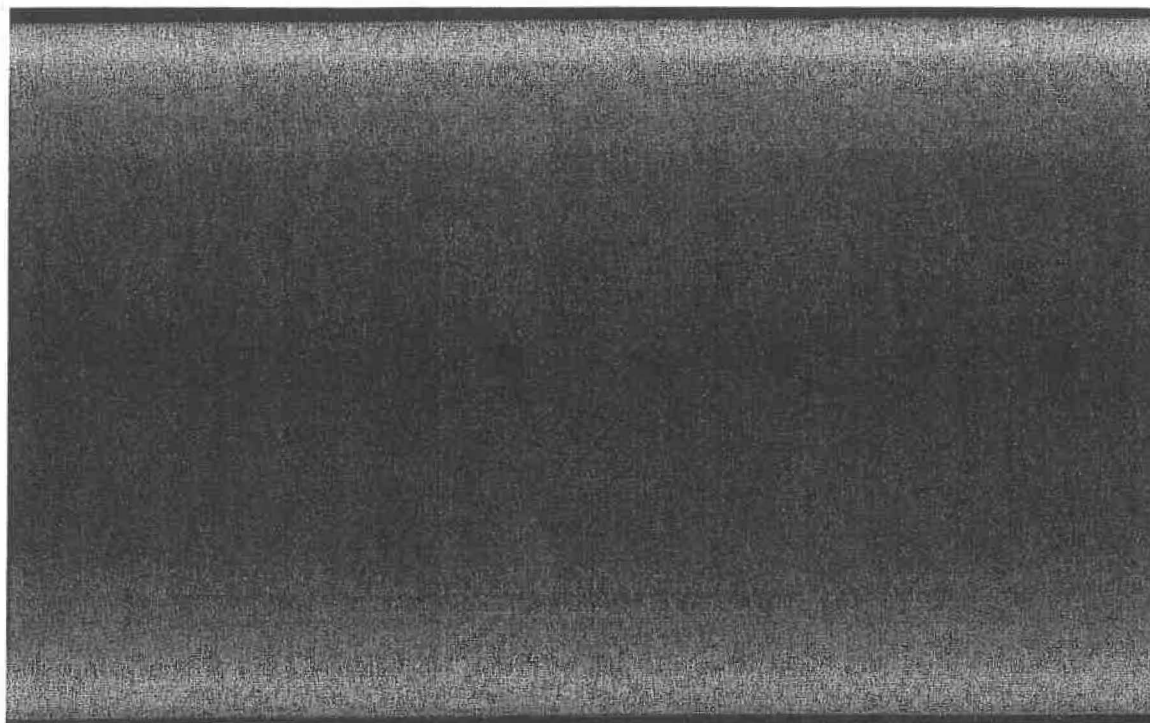


Figure A.8 : Échantillon A.

Description : Conduite usnée qui présente sept trous à fond conique perforés sur sa paroi supérieure. Ces perforations, énumérées selon leur ordre d'apparition en parcourant la paroi de gauche à droite, ont les paramètres suivants:

- Diamètre : 2 mm, profondeur : 6,45 mm frontière externe;
- Diamètre : 4 mm, profondeur : 0,5 mm frontière externe;
- Diamètre : 5 mm, profondeur : 1,5 mm frontière externe;
- Diamètre : 5 mm, profondeur : 3,2 mm frontière externe;
- Diamètre : 5 mm, profondeur : 3,2 mm frontière interne;
- Diamètre : 5 mm, profondeur : 4,7 mm frontière externe;
- Diamètre : 5 mm, profondeur : 6,45 mm frontière externe.

Tableau XI

Échantillon B

Identification de l'échantillon :	B
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	11,49 cm
Diamètre interne:	10,20 cm
Épaisseur nominale :	6,45 mm
Matériel :	Acier galvanisé

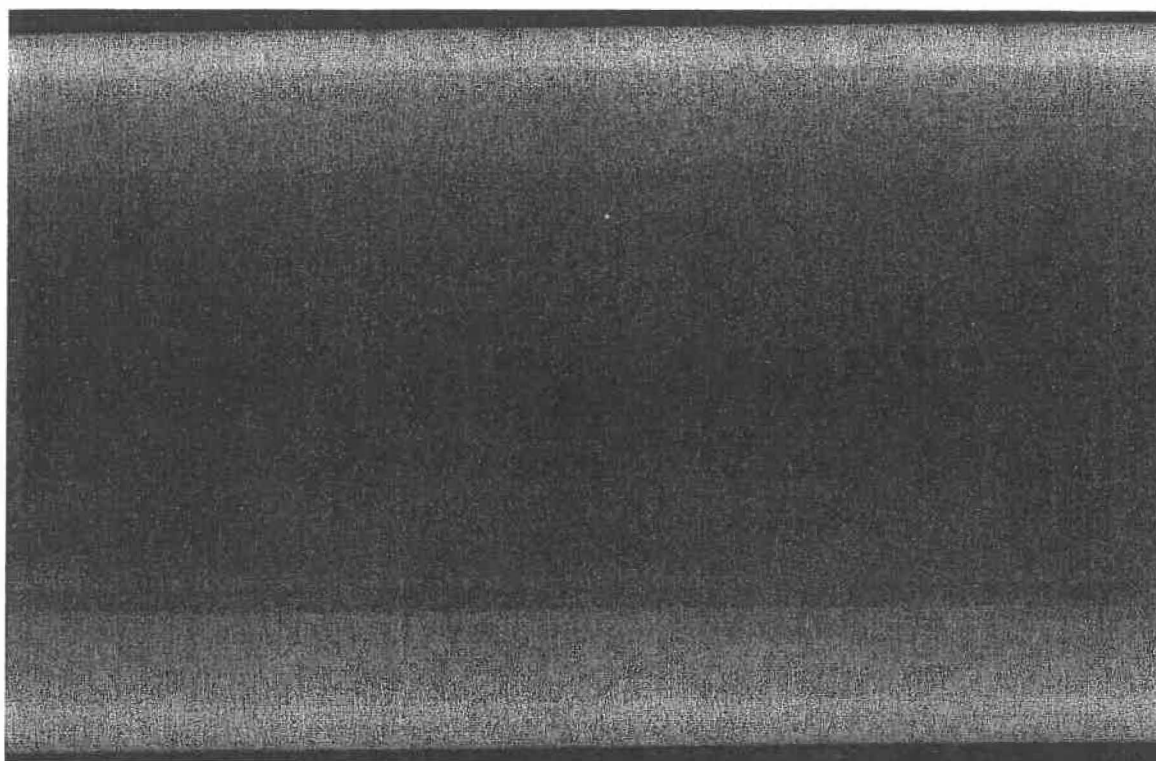


Figure A.9 : Échantillon B.

Description : Conduite usnée qui présente huit trous à fond conique perforés sur sa paroi supérieure. Ces perforations, énumérées selon leur ordre d'apparition en parcourant la paroi de gauche à droite, ont les paramètres suivants:

- Diamètre : 2 mm, Profondeur : 6,45 mm frontière externe;
- Diamètre : 4 mm, Profondeur : 0,5 mm frontière externe;
- Diamètre : 4 mm, Profondeur : 1,4 mm frontière externe;
- Diamètre : 4 mm, Profondeur : 3,3 mm frontière externe;
- Diamètre : 4 mm, Profondeur : 3,1 mm frontière interne;
- Diamètre : 4 mm, Profondeur : 4,4 mm frontière externe;
- Diamètre : 4 mm, Profondeur : 4,9 mm frontière interne;
- Diamètre : 3,5 mm, Profondeur : 6,45 mm frontière externe.

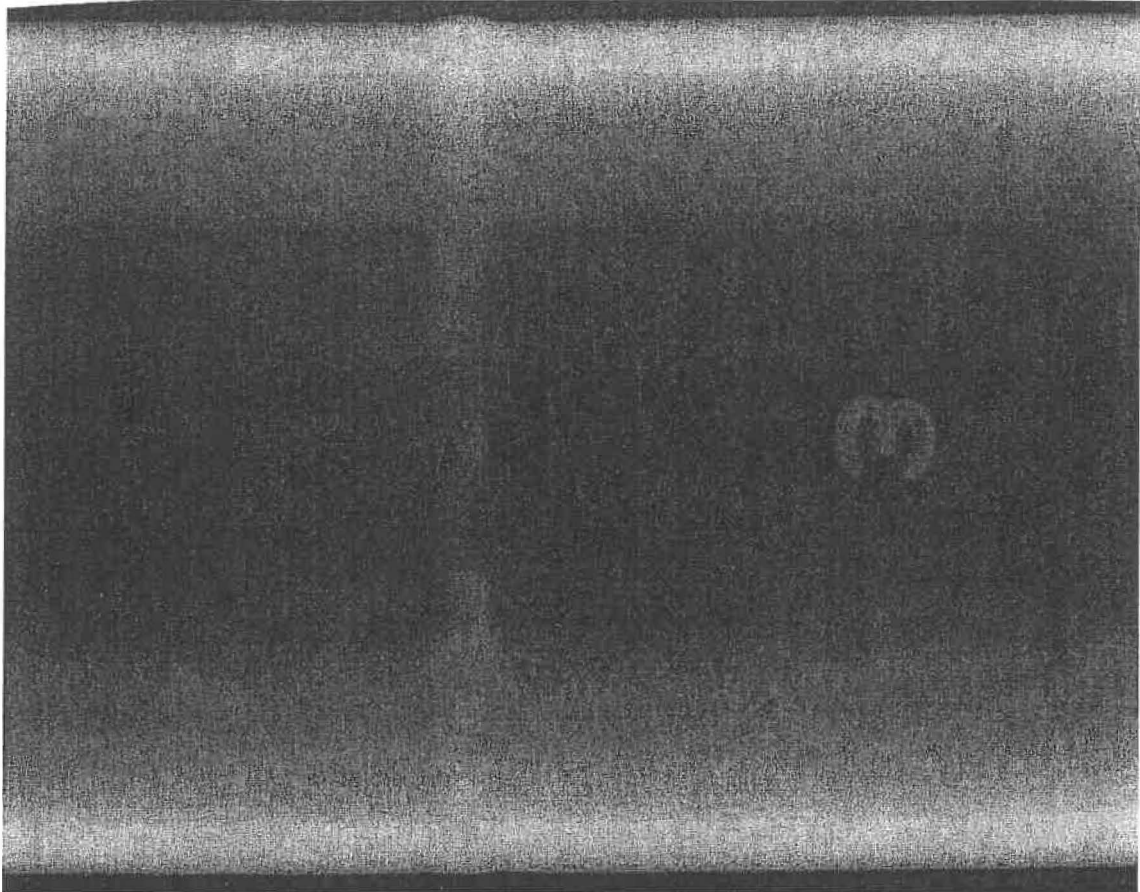


Figure A.10 : Échantillon SO1, conduite d'acier non altérée avec soudure circonférentielle, utilisée pour la détection des frontières de paroi externe.

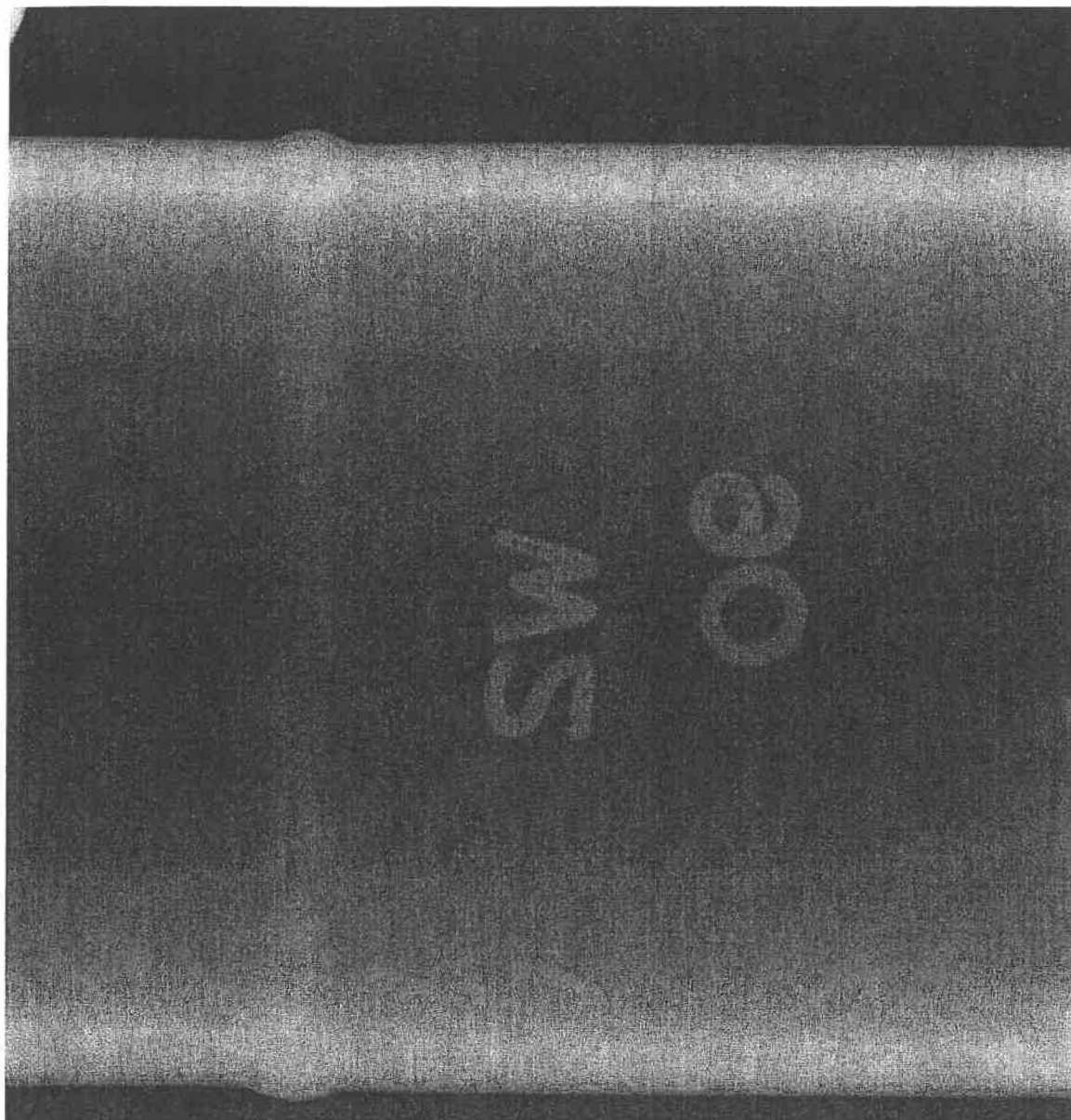


Figure A.11 : Échantillon SO2, conduite d'acier non altérée avec soudure circonférentielle, utilisée pour la détection des frontières de paroi externe.

Tableau XII

Échantillon T1

Identification de l'échantillon :	T1
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	11,49 cm
Diamètre interne:	10,20 cm
Épaisseur nominale :	6,45 mm
Matériel :	Acier galvanisé

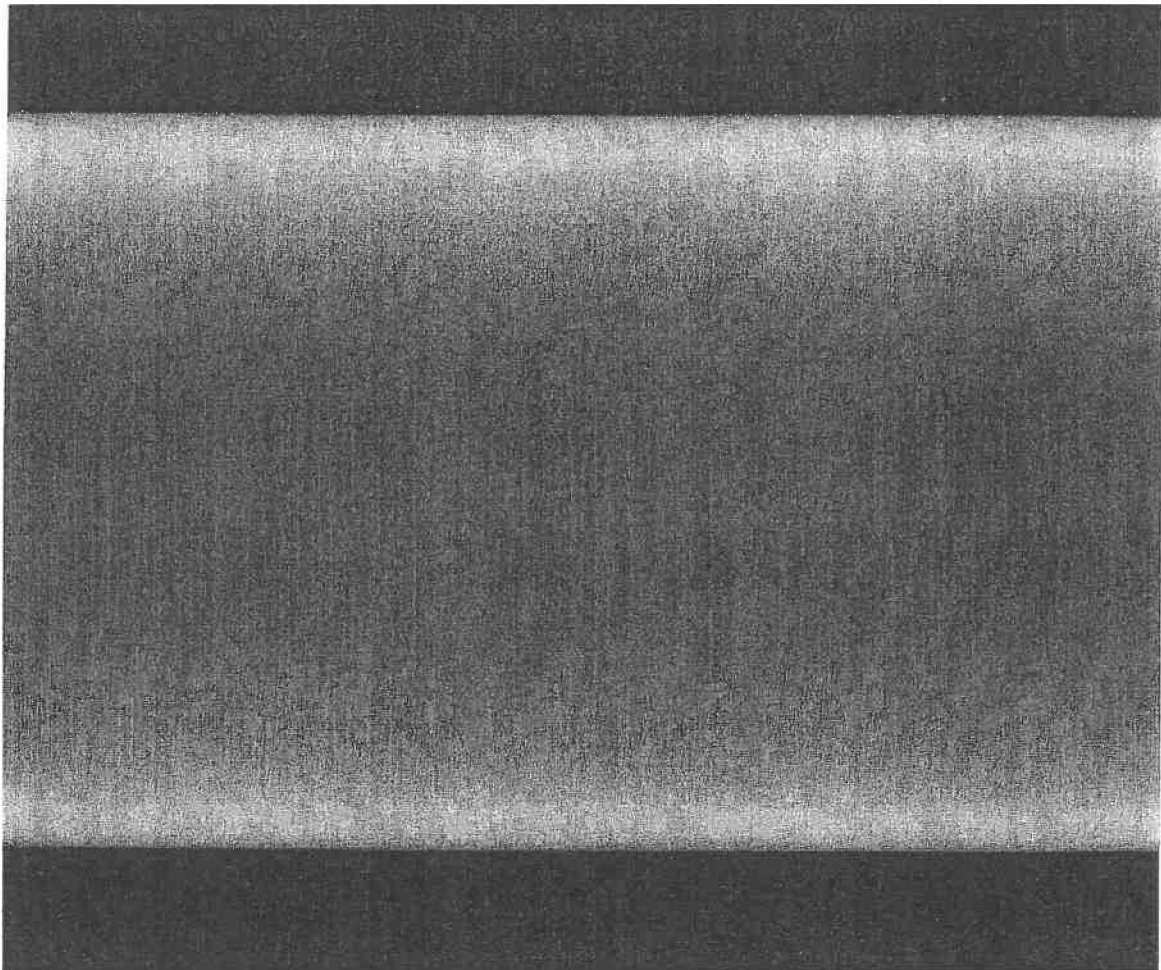


Figure A.12 : Échantillon T1, conduite corrodée en laboratoire.

Tableau XIII

Échantillon T2

Identification de l'échantillon :	T2
Type de pièce :	Tuyau
Diamètre externe:	11,49 cm
Diamètre interne:	10,20 cm
Épaisseur nominale :	6,45 mm
Matériel :	Acier galvanisé

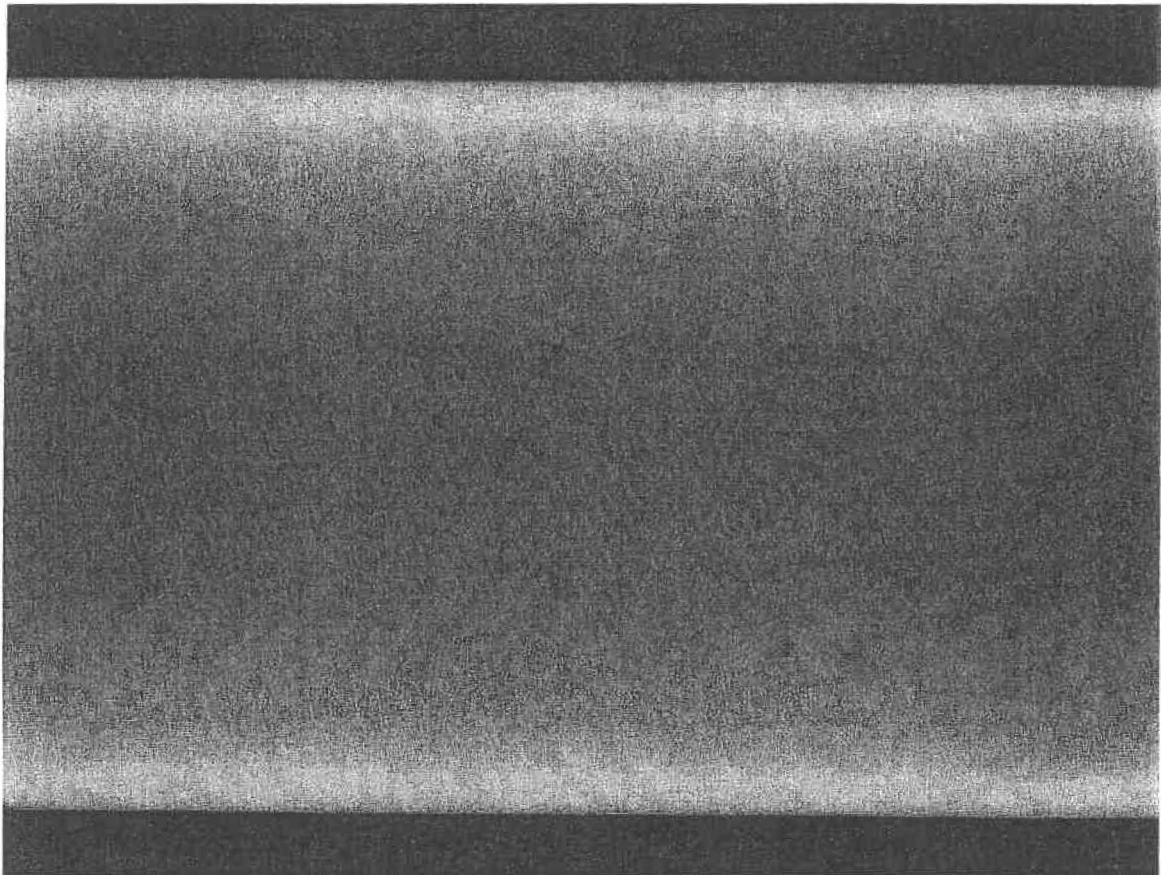


Figure A.13 : Échantillon T2, conduite corrodée en laboratoire.

Références

- [1] RUAULT, P. A., '*Radiologie industrielle tome I*', Publications de la soudure autogène, 1991.
- [2] LEE S., JANG B. and al, '*Thickness evaluation of pipes using density profile on radiographs*', 10th APCNDT, 2001.
- [3] LAHURE, P., '*Détermination of Thickness Variations by Measuring Film Densities on Two Adjacent Areas of a Radiograph*', *Matériaux Évaluation, American society for non-destructive testing inc*, 1985.'
- [4] BURKLE, W.S., '*Application of the tangential radiographic technique for evaluating pipe system erosion/corrosion*', Materials evaluation, American society for non-destructive testing inc, 1989.
- [5] LANDOLT, D., '*Corrosion et chimie de surfaces des matériaux*' Traité des matériaux, Vol 12, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1993.
- [6] <http://www.tecnitest.com>
- [7] <http://www.nomadinspection.com/specialty.html>
- [8] FONTANA, M. G., '*Corrosion Engineering*', McGraw-Hill Book Compagny, 3^{iem} édition, 1987.
- [9] SOOD, S. C., '*Corrosion Assessment with NDT digital radiography*', Safety Assessment with NDT Digital Radiography / Radioscopy, <http://www.cituk-online.com/acatalog/Corrosion%20assessment%20with%20Digital%20Radiography.pdf>.
- [10] EKINCI, S., Bas, N. and al., '*Corrosion and deposit measurements in pipes by radiographic techniques*', Insight, Vol 40, no 9, September 1998.
- [11] RHEINLÄNDER J., CHRISTIANSEN H.H, '*Using film density variations for determination of pipe thickness variation in γ -ray radiography*', Insight, Vol 37, no 9, September 1995.
- [12] BELENKIJ, J., '*A New Method for Radiographic Image Evaluation for Pipe Wall Thickness Measurement*', 15th World Conference on Non-Destructive Testing, 2000.
- [13] CASTLEMAN, K. R. '*Digital Image Processing*', Prentice Hall Inc., 1996.

- [14] HARARA W., '*Critical comments on the optimum determination of remaining wall thickness in insulated pipes by tangential radiography*', Insight, Vol 43, no 10, octobre 2001.
- [15] REDOUANE D., YACINE K. and al, '*Evaluation of corroded pipelines wall thickness using image processing in industrial radiography*', 15th WCNDT, 2000.
- [16] MARSTBOOM, K. '*Computed radiography for corrosion and wall thickness measurements*' Insight, Vol 41, no 5, 1999.