



Méthodes quantitatives d'analyse d'images rayons x pour usage en test non destructif et en reconnaissance assistée de défauts

Mémoire

Yohan Bélanger

Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de nouvelles méthodes quantitatives d'analyse d'images rayons x en test non destructif. Ces méthodes permettent d'obtenir plus d'information à partir d'images radiographiques numériques et devraient faciliter l'automatisation de l'inspection industrielle de pièces. Le travail se sépare en trois parties. Premièrement, le contexte de radiographie industrielle qui a mené à ce travail de recherche sera détaillé. Ensuite, il sera question d'un article publié dans le cadre de la conférence de recherche de l'ASNT en avril 2019 [5]. Cet article propose une nouvelle méthode quantitative d'analyse radiographique pour le craquement par corrosion sous contrainte des pipelines. Il est parfait pour introduire le reste de ce mémoire puisque le travail fait dans le cadre de cet article a directement contribué au reste de la recherche. Il sera ensuite question du travail effectué pour obtenir des images rayons x de défauts internes de pièces d'inspection industrielle. Nous parlerons des nouvelles méthodes ayant été appliquées, telles que la simulation, le recalage itératif d'une image simulée et l'optimisation de la courbe d'atténuation globale de la pièce. Pour terminer, nous montrerons le résultat de ce projet sous la forme d'images de différences entre les images simulées et les images réelles.

Table des matières

Résumé	ii
Table des matières	iii
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Remerciements	x
Avant-propos	xii
Introduction	1
1 Radiographie Industrielle	3
1.1 Contexte	3
1.2 État de la science	3
1.3 Types de défauts recherchés	7
1.4 Vision numérique	7
2 High Resolution SCC Depth Map in Pipeline Samples Using New X-Ray Imaging Techniques	9
2.1 Résumé	9
2.2 Abstract	10
2.3 Introduction	10
2.4 Theory - Radiation Physics	11
2.5 Material and Methods	14
2.6 Results	16
2.7 Discussion	20
2.8 Conclusions	22
2.9 Acknowledgements	22
3 Simulation d'images rayons x	23
3.1 Physique des rayons x	23
3.2 Atténuation	25
3.3 Algorithme de Siddon	27
3.4 Algorithme d'intersection de Möller-Trumbore	32
4 Application et résultats	38

4.1	Positionnement	39
4.2	Obtention des valeurs de gris	39
4.3	Images résultantes	39
	Conclusion	44
	Bibliographie	46

Liste des tableaux

2.1	Predicted EDM notches depth and calibrated X-Ray measurements	18
2.2	SCC Depth for each of the defined regions	19
2.3	Comparison between our data and Eddy Current analysis	20
3.1	Temps de calcul en fonction du nombre de triangles	37
3.2	Temps de calcul en fonction du nombre de pixels	37

Liste des figures

1.1	Schéma d'un film argenté	5
1.2	Schéma d'une plaque au phosphore[4]	5
1.3	Schéma d'un détecteur direct et indirect [3]	6
1.4	Exemples d'images de soudures segmentées [22]	8
2.1	Relative importance of the three major types of X-Ray interations [1]	12
2.2	Example of X-Ray Mass attenuation coefficient [12]	12
2.3	Klein-Nishina distribution of scattering-angle cross sections over a range of commonly encountered energies	13
2.4	Notch #2, 1 mm depth	17
2.5	Notch #3, 2 mm depth	17
2.6	Notch #4, 3 mm depth	17
2.7	Notch #11, 1 mm depth	17
2.8	Full depth map of the sample	18
2.9	Zoomed depth map of region 2	18
2.10	Overhead view of the 3D depth map	19
2.11	Underneath view of the 3D depth map	20
2.12	Eddy current analysis depth map	20
3.1	Couches électroniques pour l'hydrogène et le tungstène [6]	24
3.2	Interactions entre les couches électroniques de l'atome [6]	25
3.3	Rayonnement continue de freinage	25
3.4	Domaine des interactions en fonction de l'énergie des photons et du Z_{eff} du matériau [1]	26
3.5	Visualisation des voxels comme une série de plans parallèles [20]	28
3.6	Vue complète d'un tube	30
3.7	Vue de près du tube	30
3.8	Vue d'une jante simulée	31
3.9	Vue de près de la jante	31
3.10	Temps de calcul pour 21 images avec une résolution de 1000x1000 pixels	31
3.11	Translation et normalisation du triangle [17]	33
3.12	Arrangement d'une grille [18]	34
3.13	Hiérarchie de la mémoire [18]	34
3.14	Seuls les points D , E , F et J sont dans le champ de vue du détecteur [10]	35
3.15	Vue d'une jante simulée avec Möller-Trumbore	36
3.16	Vue de près de la jante	36
3.17	Temps de calcul vs. nombre de triangles	37
3.18	Temps de calcul vs. nombre de pixels	37

4.1	Vue de la pièce de calibration utilisée [7]	38
4.2	Image de longueurs de parcours	40
4.3	Courbe de correspondances entre les épaisseurs et les valeurs de gris	40
4.4	Image originale de la pièce de calibration	41
4.5	Image de différence de la pièce de calibration	42
4.6	Images originales et de différences de la pièce de moteur	43
4.7	Vue de près de l'image de différence	43

À ma mère

Science is the belief in the
ignorance of experts

Richard Feynman

Remerciements

Mon parcours aux études graduées a été la période la plus difficile de ma vie. Cela fait maintenant sept ans que j'ai entamé ces études et je peux enfin dire mission accomplie. Je veux remercier en premier lieu ma mère, Renée Houde, que j'ai perdu à la fin de mon baccalauréat. J'aimerais remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à passer au travers de ces étapes difficiles, notamment mes meilleurs amis Dave Mayot-Gagné, Marc-Antoine Langevin, Yassine Attik et tout les autres de la "gang". J'aimerais aussi remercier ma soeur Marjorie Bélanger ainsi que mon père Charles Bélanger d'avoir tant bien que mal participé à mon retour à la normale. En 2017 j'ai joint l'équipe de Lynx Inspection afin d'utiliser mon expérience en simulation de dose de radiation. À cet endroit que j'ai rencontré des personnes extraordinaires. J'aimerais donc remercier Luc Perron et Martin Lacasse pour avoir été des mentors tant sur le plan technique que professionnel. J'aimerais aussi remercier Charles Brillon, Dominique Boutet, Vincent Boulet, Roger Booto Tokime et tout les autres de m'avoir aidé de près ou de loin dans l'accomplissement de cette recherche. Je pense aussi à remercier les collègues et les professeurs que j'ai eu en physique médicale. Les connaissances que j'ai acquises lors de mon passage dans ce programme m'ont grandement servi dans mon début de parcours professionnel chez LynX et le projet de recherche que j'avais a directement mené au développement du simulateur. J'ai finalement décidé de commencer le programme de maîtrise en génie électrique en 2018, suite à la rencontre des directeurs du programme oNDuTy. J'aimerais donc terminer en remerciant mon directeur de recherche Xavier Maldague ainsi que Clemente Ibarra Castanedo de m'avoir invité dans leur programme. Mais non ! Je ne peux pas terminer comme ça ! Il faut que je remercie ma conjointe Valérie Pepin (pas d'accent) de m'avoir soutenu tout le long des trajectoires excentriques de mon humeur, surtout pendant le confinement dû à la pandémie de la COVID-19. Oui, aussi mal que mes études ont commencées, je les termine maintenant en écrivant ces lignes pendant le confinement du mois d'avril 2020. C'est tellement bizarre ce qui se passe présentement, le Québec est en pause et plus personne n'est dans les rues. J'aimerais aussi remercier ma belle-famille, notamment Anne Chouinard, Gaston Pepin et Marc-Antoine Pepin de m'avoir accueilli chaleureusement. Il reste maintenant plus qu'à saluer les gars du Scanner, David, Jason et les autres. Voilà, je crois que c'est tout, je retourne maintenant dans mon mode chômage pyjama du confinement, en espérant que tout cela se règle rapidement. J'aimerais terminer, pour vrai cette fois-ci, par une citation de ma mère lorsque nous étions

en voyage au Mexique en 2012. Je crois qu'elle est absolument de circonstance : "À tout ceux qui nous aimes ! Pi les autres qui mangent de la m****!". Je t'aime mom.

Avant-propos

Dans ce mémoire nous avons inséré un article qui a qui s'intitule "High Resolution SCC Depth Map in Pipeline Samples Using New X-Ray Imaging Techniques" [5]. Il a été conçu suite à la réalisation d'une partie de recherche qui impliquait l'application d'une méthode quantitative pour trouver les profondeurs de craques dans des échantillons de pipelines en appliquant une table d'épaisseurs en fonction des valeurs de gris sur les images obtenues. La recherche a été effectué par l'auteur de ce mémoire. L'article a aussi été écrit par l'auteur de ce mémoire. L'article a été soumis le 11 mars 2019 et la date d'acceptation/publication est le 1er avril 2019. Il n'y a aucune différence entre le chapitre de l'article et l'article publié. M. Luc Perron, de Lynx Inspection, mon partenaire industriel, a agit en tant qu'examinateur et a fourni l'équipement nécessaire à la recherche. Prof. Xavier Maldague a agit en temps que directeur de recherche.

Introduction

Le test non destructif vient de la nécessité de localiser et de quantifier les défauts et la dégradation des propriétés d'un produit ou d'un matériau qui pourraient mener à la défaillance de structures d'ingénierie. La qualité d'un objet fabriqué est habituellement quantifiée de manières destructives sur des échantillons de la production totale. Dans les cas où le produit est facilement recyclable directement dans la chaîne de production et que la qualité de sa production ne change pas drastiquement la qualité de son utilisation, les modèles statistiques peuvent souvent suffire. L'évaluation non destructive intervient dans le cas particulier des pièces critiques pour lesquelles une défaillance pourrait avoir des conséquences catastrophiques. Si elle est bien utilisée, elle peut aussi réduire considérablement le nombre de rejets d'une usine. Rejets qui seront maintenant basés sur les résultats de chacune des pièces ou d'un plus petit groupe, car elle ne détruit pas la pièce.

Évaluation radiographique

La radiographie existe depuis maintenant plus de 100 ans. Ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale qu'elle a vraiment fait son apparition dans la production de pièces d'ingénierie. Avant ce temps, les matériaux étaient utilisés bien en dessous de leur rendement physique maximal. Le milieu de l'aviation a grandement contribué au développement de la radiographie industrielle, puisque les designer devaient obtenir un rendement physique maximal pour un poids minimal. La marge de manoeuvre précédemment utilisée n'était maintenant plus disponible. Les pièces étaient alors exposés à la radiation et l'image était capturée à l'aide d'un film argenté. Au fil du temps les films se sont améliorés, et sont même devenus réutilisables sous forme de cassette au phosphore. Depuis le temps de ces cassettes par contre, la technologie n'a plus beaucoup évoluée, si bien qu'encore aujourd'hui des entreprises utilisent ce médium pour capturer des images radiographiques.

Passage au numérique

La radiographie numérique est plutôt récente et découle principalement d'un besoin médical de réduire le temps d'exposition nécessaire pour obtenir une image. Une réduction du temps d'exposition se traduit donc directement en une réduction de la dose absorbée par

le patient. Dans un contexte industriel la dose n'est évidemment pas un problème et c'est pourquoi l'industrie prends du temps à s'adapter au numérique. Les avantages sont pourtant nombreux. Elle est plus facile, plus rapide et réutilisable indéfiniment selon la durée de vie du détecteur. L'avantage le plus marqué est la possibilité d'automatiser d'un bout à l'autre le pré-traitement et l'analyse des images, permettant de développer des outils de détection de défauts automatiques, comme dans le présent document. Avec ce mémoire nous espérons contribuer au développement de la vision numérique dans un contexte de radiographie industrielle en présentant des outils mathématiques et logiciels précis et performants.

Chapitre 1

Radiographie Industrielle

1.1 Contexte

La radiographie industrielle est une méthode de test non destructif où plusieurs types de pièces fabriquées et structures d'ingénierie peuvent être examinés afin de vérifier leur intégrité physique interne et externe. Elle peut être effectuée en utilisant plusieurs types de source de radiation ionisante, principalement les rayons x et les rayons gamma, mais de nouvelles méthodes d'inspection aux neutrons sont présentement en développement. L'avantage de la radiation ionisante, comparativement à la lumière par exemple, est la capacité de celle-ci à pénétrer et traverser plusieurs types de matériaux. De plus, puisque la longueur d'onde de cette radiation est très courte, il est possible de résoudre de très petit détail. En effet, l'équation de la limite de résolution [11] est donné par

$$(\Delta\ell)_{min} = \frac{1.22f\lambda}{D} \quad (1.1)$$

ou ℓ est la distance minimale de résolution entre deux objets sur le détecteur, f est la longueur focale du système, λ est la longueur d'onde de la radiation et D est le diamètre du collimateur de la source. Il est donc possible de voir que la séparation minimale de résolution d'un système est directement proportionnel à la longueur d'onde. Cette méthode d'inspection n'est toutefois pas infaillible. En effet, il est plutôt difficile de capturer des images de grands objets, ou composés de matériaux très atténuants sans avoir un impact non négligeable sur le coût de l'acquisition elle même.

1.2 État de la science

Bien que de plus en plus d'entreprises possèdent des détecteurs numériques, beaucoup travaillent encore avec de vieilles technologies. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce passage tardif au numérique. Contrairement au domaine médical, où le passage au numérique a été

très rapide, la dose de radiation reçue par la pièce n'est pas de la plus grande importance. En effet, les détecteurs numériques permettent de prendre des acquisitions très rapidement et nécessitent beaucoup moins de temps d'exposition que les films radiographiques. Une autre raison pourrait être la rigueur des standard d'inspection de l'industrie qui sont intimement liés à la méthode d'acquisition utilisée. Et pour terminer, il peut être difficile pour une entreprise de rentabiliser l'achat d'un détecteur numérique si celle-ci fait peu d'inspection radiographique. Nous allons donc couvrir rapidement les deux autres méthodes d'imagerie rayons x.

1.2.1 Films

Les films argentés ont été la principale et même la seule technologie d'acquisition d'images rayons x pendant plusieurs années. Comme il est possible de le voir à la figure 1.1, un film rayons x est composé d'une couche d'émulsion contenant des halogénures d'argent dans un liant gélatineux, d'une base en plastique flexible et d'une couche d'antihalation. Lorsque les photons frappent les grains contenus dans l'émulsion et y déposent de l'énergie, une réaction chimique se produit dans ceux-ci et leurs propriétés chimiques sont modifiées. Le film est développé en étant trempé dans une succession de produits chimiques ayant des propriétés et des effets différents. Ces produits réagissent avec les grains et produisent une réaction qui rend opaques les grains ayant été modifiés par l'énergie des photons. Le contraste est obtenu parce que les parties plus atténuantes de l'objet ont empêché les photons d'aller modifier les grains derrière elles. À ce jour, le film est encore, en théorie, le moyen de capture possédant la plus grande résolution puisque la taille des grains est de l'ordre du nanomètre. Il est cependant impossible d'effectuer du "post-processing" sur un film directement à moins d'utiliser un scanner et perdre en partie la résolution, ce qui fait en sorte qu'il est vulnérable à plusieurs artefacts tels que l'effet talon de la source.

1.2.2 Plaques au phosphore

La plaque au phosphore, ou "Computed Radiography", est apparue au début des années 80 et est encore utilisée aujourd'hui en évaluation non-destructive. Le principe a été développé par Fuji et n'a pas vraiment changé depuis. En général il s'agit d'une cassette étanche à la lumière dans laquelle le phosphore est étendu sur une base en plastique et recouvert d'une couche protectrice. Lorsqu'il est exposé aux rayons x, le phosphore capture l'énergie de ceux-ci dans ses électrons de la même manière qu'en fluorescence, mais le temps de relaxation est beaucoup plus long et l'énergie est donc conservée un certain moment. Lors du développement, le phosphore est exposé à la lumière d'un laser rouge. Ceci permet de libérer l'énergie contenue dans celui-ci sous forme de lumière bleue. Cette lumière est ensuite capturée par un tube photo muplificateur et envoyée vers une CCD pour être numérisée. Il est possible de voir le processus à la figure 1.2.

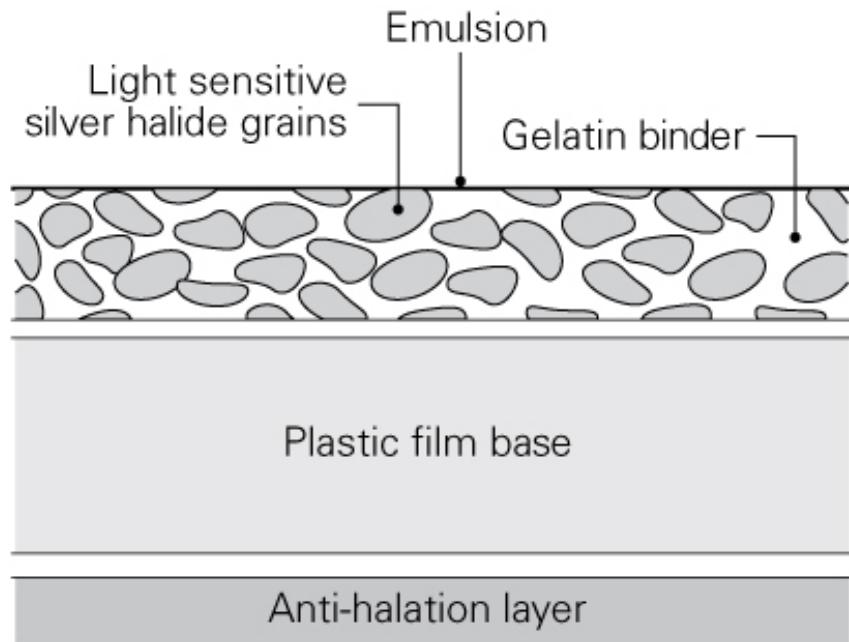


FIGURE 1.1 – Schéma d'un film argenté

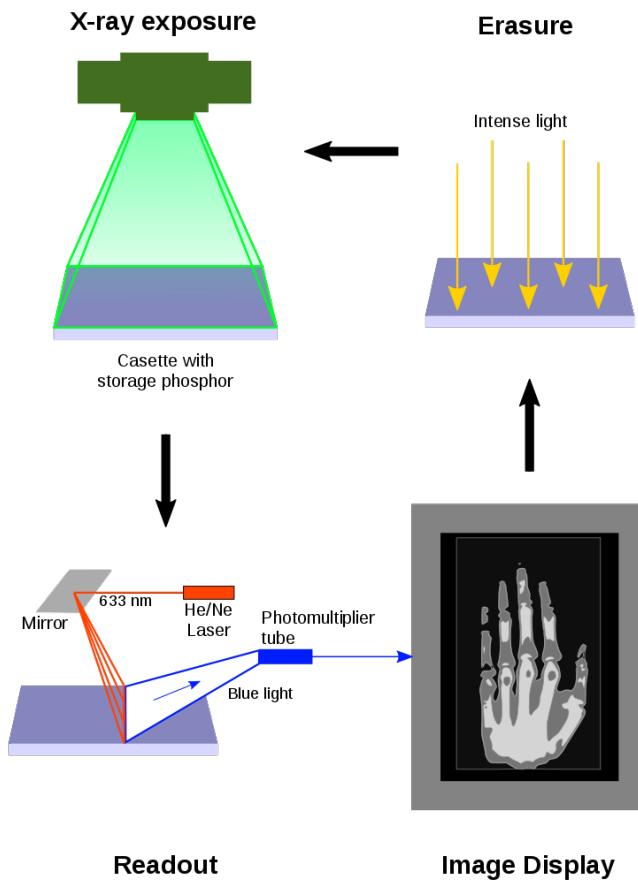


FIGURE 1.2 – Schéma d'une plaque au phosphore[4]

1.2.3 DéTECTEURS NUMÉRIQUES

Le projet de recherche menant à ce mémoire a nécessité l'utilisation d'un détecteur rayons x numérique. Cette modalité de capture d'images est plutôt rare en test non destructif puisque la plupart des standards d'inspection de l'industrie sont basés sur l'inspection avec film. Les deux principaux types de détecteurs numériques sont les détecteurs directs et indirects. Comme il est possible de le voir à la figure 1.3, les détecteurs directs ont une couche de semi-conducteur qui absorbe directement les rayons x pour les transformer en signal électrique qui sera ensuite capté par la matrice de pixels. Les détecteurs indirects, comme celui utilisé lors des mesures de ce projet, possèdent une couche de matériel scintillant qui capte les rayons x pour les transformer en lumière visible. Cette lumière est ensuite captée par une matrice de pixels sensibles à la lumière visible.

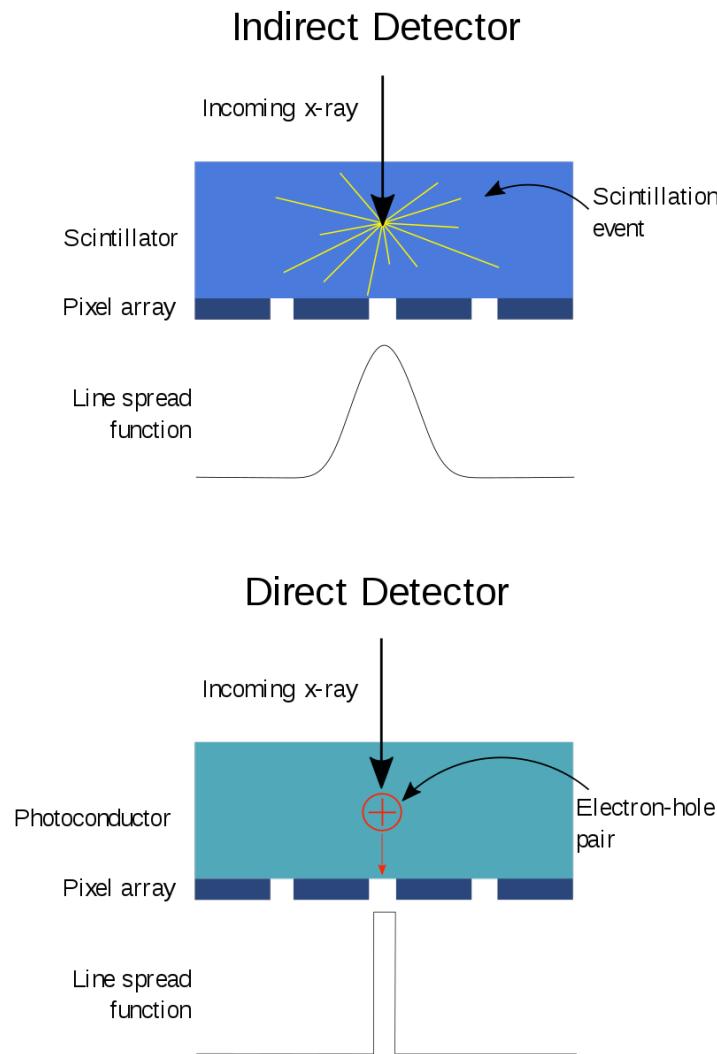


FIGURE 1.3 – Schéma d'un détecteur direct et indirect [3]

Toujours à la figure 1.3, il est possible de constater l'avantage d'un détecteur direct sur un indirect. Effectivement, la lumière a tendance à diffuser dans le scintillateur, ce qui cause un flou dans les contrastes de l'image. Évidemment, des méthodes pour diminuer cet effet existent, comme l'utilisation d'une matrice de fibre optique en dessous du scintillateur qui permet d'éliminer une grande partie des photons n'ayant pas un angle d'incidence perpendiculaire au détecteur.

1.3 Types de défauts recherchés

Avec l'aide de la radiographie industrielle, il est possible d'évaluer plusieurs types de défauts différents dans plusieurs types de matériaux différents. Dans le cadre de cette recherche, nous nous sommes concentrés sur les défauts apparaissant lors du moulage d'aluminium en fonderie. Comme il est possible de le constater, même dans ce cas spécifique, plusieurs types de défauts existent. En voici quelques-uns [8].

- Défauts de rétrécissement dus à une contraction du volume durant la solidification
- Porosités causées par la présence de gaz
- Imperfections et porosités liées au remplissage du moule
- Phases indésirées, telles que les inclusions d'oxides
- Défauts de contraction thermique
- etc.

Bien que chacun de ces défauts puisse causer des problèmes, cette recherche s'est concentré sur les défauts de types porosités. Elles sont le type de défaut le plus prédominant dans les pièces analysés et peuvent causer des défaillances importantes. En effet, il a été démontré qu'il existe un lien clair entre la taille des porosités et la limite d'endurance d'une pièce [19]. La distribution des porosités est aussi d'une grande importance puisque les effets les plus néfaste se présentent lorsque ces défauts se retrouvent sur la surface ou près de la surface de la pièce étudiée. La taille des porosités, leur distribution aléatoire ainsi que leur densité sont les facteurs clés contrôlant la limite d'endurance des pièces [15]. Sachant cela, l'inspection devient de plus en plus critique pour les fabricants de pièces. Surtout dans des domaines comme l'aviation ou l'industrie automobile puisqu'une défaillance peut mettre en danger la vie des utilisateurs.

1.4 Vision numérique

La vision numérique est la science qui donne aux ordinateurs la capacité de voir et de comprendre des images. Le but de cette science est d'étudier et de développer des algorithmes qui permettent d'interpréter le monde visuel dans lequel nous vivons. Les sujets qu'elle touche

sont variés et incluent : l'inspection automatique de défauts, l'identification de différents objets [2], la détection d'événements [24], la modélisation de l'environnement [23] ainsi que la navigation automatisée [14]. Depuis quelques années, elle a fait son apparition dans le domaine du test non destructif, comme pour l'inspection de soudures [22, 25]. Les résultats sont très intéressants et pourraient permettre d'accélérer l'inspection de ces défauts. La combinaison de la vision numérique et de l'apprentissage machine permet de segmenter et de détecter automatiquement des défauts dans les soudures, comme il est possible de le constater à la figure 1.4.

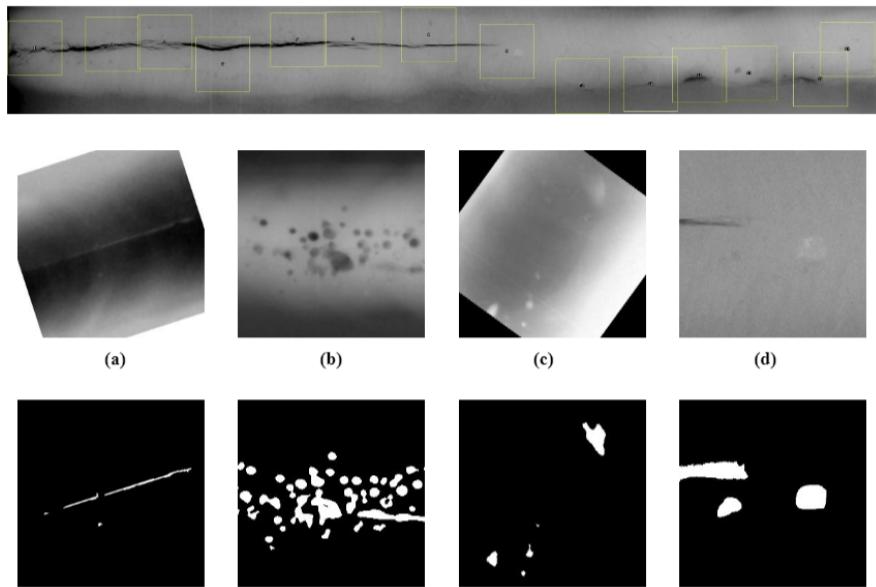


FIGURE 1.4 – Exemples d'images de soudures segmentées [22]

À la vue de tout ces résultats, il a donc été décidé d'utiliser l'énorme potentiel de la combinaison entre la vision numérique et l'imagerie radiographique numérique pour créer un algorithme qui peut permettre de détecter des défauts automatiquement dans des pièces d'aluminium moulées.

Chapitre 2

High Resolution SCC Depth Map in Pipeline Samples Using New X-Ray Imaging Techniques

ASNT Research Symposium 2019, April 1st - 5th 2019, Hyatt Regency OrangeCounty, Garden Grove, California

Yohan Belanger^{1,2}, Luc Perron², and Xavier P.V. Maldague¹

¹Université Laval

Département de génie électrique et de génie informatique
1065, av. de la Médecine, bureau 1300
Québec, Qc, Canada, G1V 0A6
(418) 656-2984 ; yohan.belanger.1@ulaval.ca

²LynX Inspection

2740 Rue Einstein
Québec, Qc, Canada, G1P 4S4
(418) 657-7706 ; ybelanger@lynxinspection.com

2.1 Résumé

Les matériaux constituant des pipelines sont sujets à différents stress et environnements corrosifs. Ces conditions mènent éventuellement à de la fissuration par corrosion sous contrainte "Stress Corrosion Cracking". Plusieurs méthodes de test non destructif existent pour détecter et évaluer ces fissures directement sur le pipeline, certaines étant plus efficaces que d'autres pour mesurer la profondeur des fissures. La mesure de la profondeur est essentielle pour déci-

der de la réparation à effectuer : une réparation rapide peu coûteuse ou le remplacement d'une section, très coûteuse en matériaux, mais surtout en temps d'utilisation perdu. C'est pourquoi ces méthodes deviennent de plus en plus importantes. Elles doivent par contre être évaluées en laboratoire avant d'être déployées sur le terrain. Ce genre d'évaluation peut difficilement être réalisée sans avoir de données réelles fiables. Une nouvelle méthode peu coûteuse d'imagerie rayons x, utilisant des corrections pour la diffusion et les aspects physiques de la fissuration par corrosion sous contrainte a été développée pour générer des modèles 3D haute résolution de fissures dans des échantillons de pipelines. Cette méthode permet d'obtenir avec précision la position et la profondeur des fissures. Nous croyons qu'elle pourrait être utilisée comme étalon pour l'évaluation d'autres méthodes non destructives, telles que le courant de Foucault ou l'ultrason, cherchant à évaluer la profondeur de telles fissures, puisque l'imagerie rayons x dans un environnement de laboratoire contrôlée peut générer de meilleures résolutions. Nous discuterons des défis à relever pour prendre de telles mesures ainsi que les techniques utilisées pour les relever.

2.2 Abstract

Materials in pipelines are subjected to a series of stress and corrosive environments. These conditions eventually lead to stress corrosion cracking (SCC). Several NDT techniques already exist to detect and assess such cracks in the field, some being more efficient than others at providing accurate depth measurements. Depth measurements are essential to help decide between a low-cost repair and an expensive section replacement, but any new NDT method first needs to be evaluated in the lab before its gets deployed in the field. Validating that the method provides trustworthy results can hardly be done without a reliable ground truth. A new low cost X-Ray imaging method, involving scatter corrections and the physical aspects of SCC, was developed to generate high resolution 3D SCC depth maps of pipeline samples showing precise crack positions and depth measurements. This method could be used as a gold standard for evaluating traditional NDT techniques, such as ultrasound or eddy current, since digital X-Ray imagery in a controlled laboratory environment can yield better resolution. We will discuss the challenges of making such measurements and the techniques used to overcome them using state of the art hardware and software.

Keywords : Digital Radiography, DR, X-ray, Computer Vision, SCC, Pipelines

2.3 Introduction

Pipeline transport is a method of long-distance transportation for fluids. They are often used to transport hydrocarbons and chemicals, but can also be used to transport water or any other liquid and gaseous products. Because pipelines are used for large volumes of fluids, any failure can have dramatic consequences. This is where non-destructive testing (NDT) can play a big

role in finding preventable defaults. One such default is Stress Corrosion Cracking (SCC). It is defined as the growth of crack formation in a corrosive environment. Several NDT techniques can be used to spot such formations in the field. Newer techniques aim to find the depth of those formations in order to help decide between a low-cost repair and an expensive section replacement.

In this paper, we will talk about new radiography imaging techniques that can provide a high resolution map of cracks in a pipeline sample, both in position and in depth. These techniques use a combination of X-Ray Physics and Computer Vision in order to get the most information out of pipeline samples. In time, we want to verify that these non destructive techniques can be used to produce ground truth data to help assess in a laboratory environment other NDT solutions that are designed to be deployed in the field. We will detail the materials and methods, explain the theory behind them and discuss our results.

2.4 Theory - Radiation Physics

Here are the primary effects that have an impact on image quality and thickness calibration.

2.4.1 X-Ray attenuation

The major interactions causing X-Ray attenuation are the Photoelectric Effect, Compton Scattering and Pair Production. However, in the energy ranges that were used in this experiment, only the Photoelectric Effect and Compton Scattering should occur (Figure 2.1). In reality, instead of computing the total cross-section of those two interactions, we use the Linear attenuation coefficient. This coefficient depends on the energy of the beam and the material it is going through (Figure 2.2). Note here that the Linear attenuation coefficient is the Mass attenuation coefficient times the material's density.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

Where :

- I = Output beam intensity
- I_0 = Input beam intensity
- μ = Attenuation coefficient
- x = Distance travelled in the material

In practice, the end result depends on the integral of the attenuation coefficient over the spectrum of the source and the materials the beam is going through. It is however possible to see from Eq.1 that material thickness predictions based on beam intensity ratios are possible if these intensities are obtained in the exact same conditions as the calibration piece.

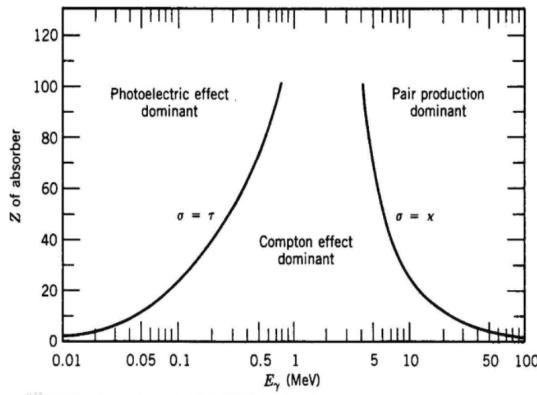


FIGURE 2.1 – Relative importance of the three major types of X-Ray interations [1]

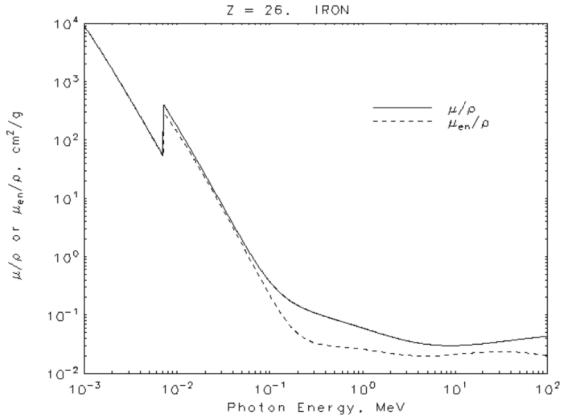


FIGURE 2.2 – Example of X-Ray Mass attenuation coefficient [12]

2.4.2 Compton Scattering

At the energy range used in this experiment, Compton Scattering is the first interaction most photons will encounter when going through the sample. It is a lossy interaction that changes the path and the energy of the incident photon and produces a recoil electron that escapes with part of the incident energy. The energy of the outgoing photon is given by 2.2 :

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (E_{\gamma}/m_e c^2)(1 - \cos \theta)} \quad (2.2)$$

Where :

- $E_{\gamma'}$ = Outgoing photon energy
- E_{γ} = Incident photon energy
- m_e = Rest mass of the electron,
- c = Speed of light
- θ = Scattering angle.

As it is possible to see, the energy of the outgoing photon depends on the scattering angle. This means that in a given material, the scattered photons that have a narrow angle will keep most of their incident energy and be able to go through the sample with a wrong angle. This wrong angle is in turn one of the reasons, along with the focal spot size of the source, for visual blurring. This means that if you have a cradle that has a too much absorbent material, the contrast lines created in the sample will be blurred before entering the detector. It is possible to see the extent of this effect by looking at the angular differential cross-section of a single photon scattered from a single free electron, also named the Klein-Nishina formula (Figure 2.3).

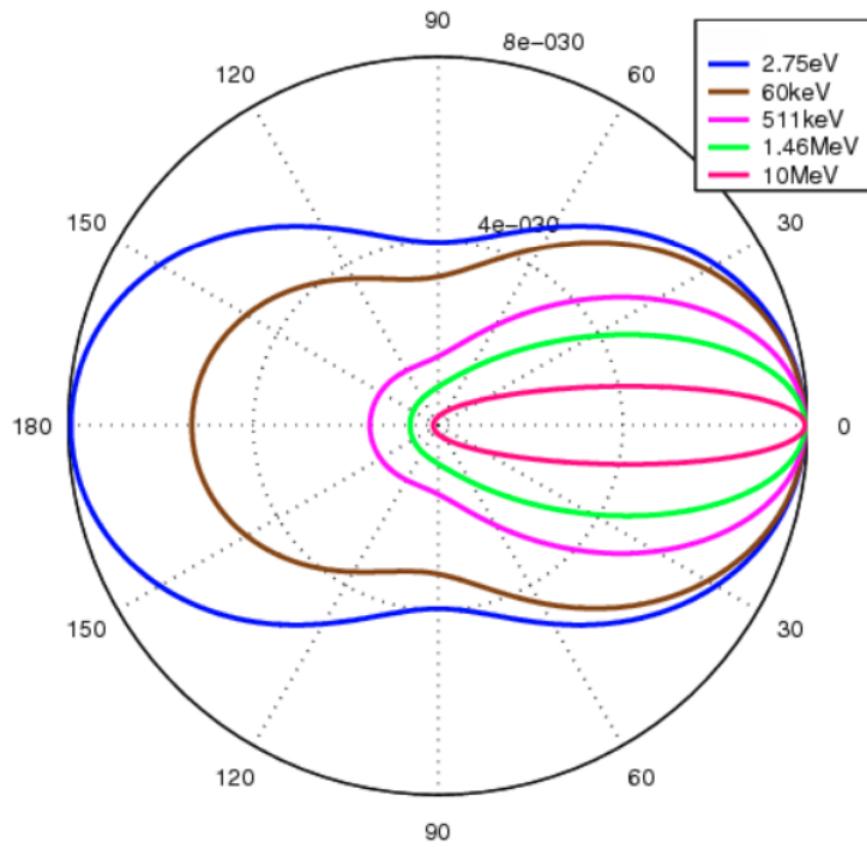


FIGURE 2.3 – Klein-Nishina distribution of scattering-angle cross sections over a range of commonly encountered energies

2.4.3 Corrosion effect on X-Ray Attenuation

Most of the photons going through the sample will eventually be stopped by the Photoelectric Effect. Indeed, when looking at the proportionality of its cross section for photons with energies above the highest atomic binding energy, it is possible to see the relation between the Photoelectric Effect, the atomic number and the incident energy of the photon.

$$\sigma \propto \frac{Z^n}{E^m} \quad (2.3)$$

Where :

- σ = Approximate cross section
- Z^n = Atomic number (with $n \approx 4$ at 0.1 MeV and $n \approx 4.6$ at 3 MeV)
- E^m = Energy of the incident photon (with $m \approx 3$ at 0.1 MeV and $m \approx 1$ at 5 MeV)

As it is possible to see from this equation, the photoelectric effect decreases steeply with the energy of the incident photon leaving room for compton scattering at higher energies. It also increases steeply with the atomic number of the material [1]. Without going into the chemical details of corrosion, this process results in the bounding of lighter elements (like Oxygen or Chlorine) to the steel of the pipeline. From a radiation physics viewpoint, corrosion has the effect of lowering the effective atomic number of the samples, meaning that the photoelectric effect will be less effective at stopping radiation. It will have the effect of making parts of the samples appear thinner in the captured images.

2.5 Material and Methods

In this section we will discuss the experimental setup and the methods used to clean the images.

2.5.1 Experimental setup

X-Ray source

We used a 150 kV, 500 A X-Ray source with a focal spot size of around 50 m. It is a cone-beam source with a solid angle of 45° and using a constant potential (as opposed to a pulsed beam). In this experiment, the applied potential ranged from approximately 100 kV to 150 kV and the current from approximately 300 A to 500 A.

X-Ray Imaging Detector

We used a detector equipped with an array of CMOS sensors coupled with a GadOx scintillator that produced 14 bpx images. The size of the array was 3096 x 3100 pixels with a resolution of 0.099 mm. The active area was 306 x 307 mm and could record images at 30 fps using two Camera Link cables. The source was placed at about 550 mm above the detector. We made sure that the detector array was circumscribed by the circle of the cone beam, meaning that the beam completely covered its active area.

Linear translation stage

We used a high precision, high accuracy 2D linear translation stage that moved on a set of rails mounted on an optics table. The height of the sample was set with a sturdy assembly of aluminum pegs bolted to the head of the moving cradle assembly.

Radiography Cabinet

We used a lead-lined NDT cabinet that was rated for the dose-rate of our source and met the radiation safety requirements of the Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC).

Pipeline samples

The pipeline samples were provided by a local NDT company and had already been inspected using magnetic particle inspection, meaning the cracks were visible on the sample. Their size was around 200 x 100 mm and were made from very corroded X52 steel with varying thicknesses from 7 to 11 mm. A separate sample made of the same steel contained a series of thin EDM notches with distinct pre-defined depths was used as a reference. All samples were scanned at a height of approximately 320 mm above the detector array lying on an extruded polystyrene sheet.

Software used

Most of the software we used was based on open source libraries. Image processing and analysis was done using a combination of custom Python and C++ software utilities. Additional software tools were developed in Python and C++ to streamline the data analysis process. Some of the more detailed analysis required manual interventions.

2.5.2 Methods

In this section we will discuss the methods we used for image production, processing/cleaning and analysis.

Image acquisition

We used the intrinsic geometrical magnification of our X-Ray setup to increase the resolution of the images and make the cracks more visible. As a result, the sample size exceeded considerably the available field of view of the detector which lead to the development of a custom image stitching algorithm. This algorithm automatically stitched all of the images together based on the given height of the sample and its relative XY position on the linear stage. To reduce the effects of noise and the geometric magnification of the penumbras in the images, we captured many images at every position and used the averaged result.

Image pre-processing

Detector background noise and intensity discrepancies caused by the source's heel effect were cleaned by using a custom polynomial gain and offset correction algorithm. We then removed the bad sensors by using a bilinear filter and rescaled the images to 16 bpx to facilitate processing. This process chain, which was repeated with every averaged image received from the detector, could be compared in essence to a flat field correction.

Depth calibration

We used a custom-made step wedge made out of a plate of X52 steel. The wedge was machined with steps ranging from 1 to 9 mm in height and 12 mm in length. The wedge was used as an intensity to thickness calibration piece. We were able to reduce the effects of X-Ray scattering by isolating each step of the wedge with other steel plates during capture. This effectively reduced the edge effects and it was decided that the samples were to be scanned in this manner also. During this exercise we also found out that using polystyrene as the cradle base for the samples was preferred over a polyethylene base as it reduced diffusion blurring. We very carefully scanned each step and got the grey value to thickness curve from which we could start our work.

Depth analysis

We first started by verifying that the thickness curve we got from the step wedge was self consistent and could predict thickness well enough to verify the depth of the EDM notches on our machined sample. The thickness curve was applied to the stitched images of the pipeline samples and we started the analysis. We used a rolling-ball background subtraction algorithm that could attenuate the error caused by the curvature of the sample. We later applied a correction that took into account the degree of corrosion around the cracks. This correction is based on X-Ray attenuation physics and the change in effective atomic number of steel after being corroded.

2.6 Results

In this section we will discuss the results obtained from the calibration plate and the samples.

2.6.1 Crack Depth

EDM notched plate

The first results came from the EDM machined plate with cavities of known depths. This plate was not corroded so we could test our image processing and depth finding algorithms on it. We had values for multiple notches but only a few will be presented here. The analysed depths were between 1 and 3 mm. The resulting images of each analysed EDM notches are presented in Figures 2.4, 2.5, 2.6 and 2.7. The structures on the left and the right of the highlighted cavities are other cavities with known depths, they appear faded because they were not centered in the image when it was captured and the curvature of the sample affected their contrast. Having these results in hand, we were ready to analyse an actual pipeline sample.

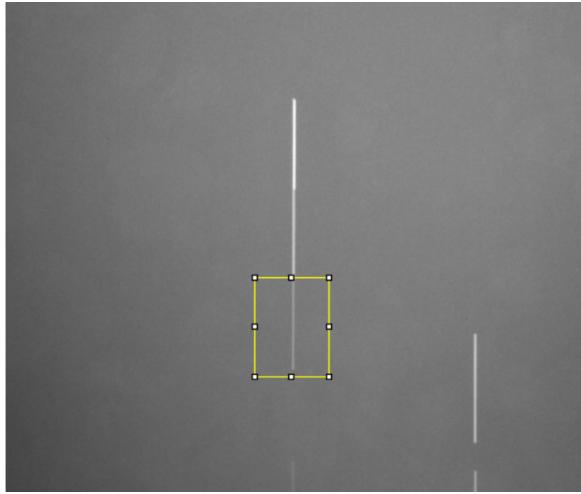


FIGURE 2.4 – Notch #2, 1 mm depth

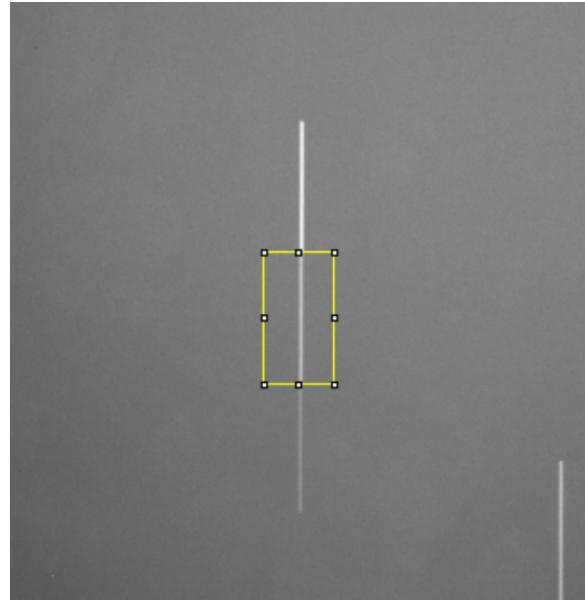


FIGURE 2.5 – Notch #3, 2 mm depth

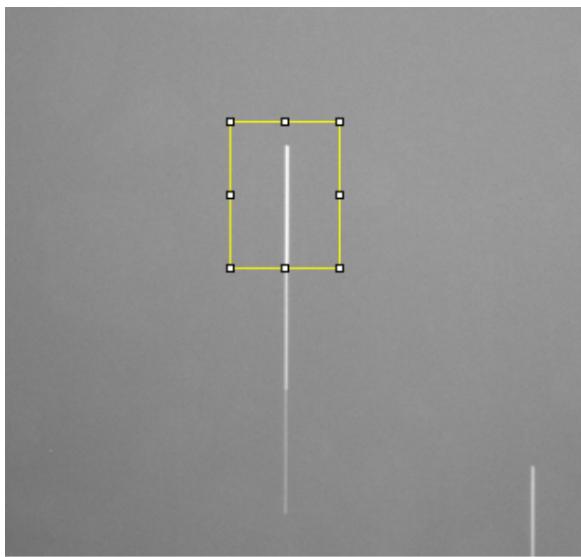


FIGURE 2.6 – Notch #4, 3 mm depth

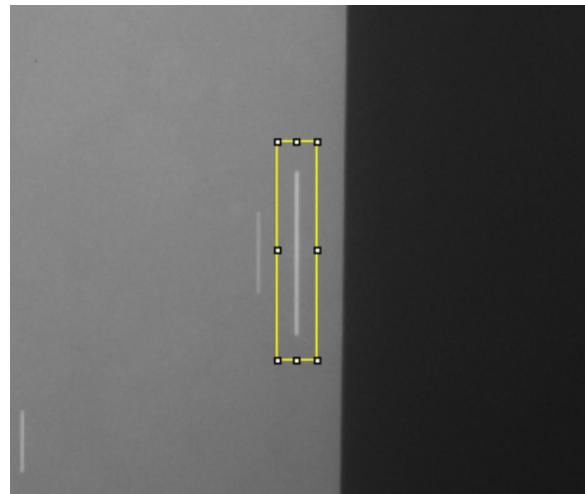


FIGURE 2.7 – Notch #11, 1 mm depth

Notch #	EDM Depth	Measured Depth	Absolute Error	Relative Error
2	(1.00 ± 0.05) mm	0.938 mm	0.063 mm	6.67%
3	(2.00 ± 0.05) mm	2.166 mm	0.166 mm	7.68%
4	(3.00 ± 0.05) mm	2.863 mm	0.137 mm	4.79%
11	(1.00 ± 0.05) mm	0.982 mm	0.018 mm	1.83%

TABLE 2.1 – Predicted EDM notches depth and calibrated X-Ray measurements

Pipeline sample

Several samples were thoroughly analysed during this research, but for simplicity, we will focus in this paper on the results from only one of these samples. The experiments and analysis of this sample were repeated enough to ensure the repeatability of the methods. For a better understanding of the regions of interest in the sample (ROI), we will start by showing in Figure 2.8 the full stitched depth map of the sample with highlighted ROIs and then move on to the analysis of each individual region.

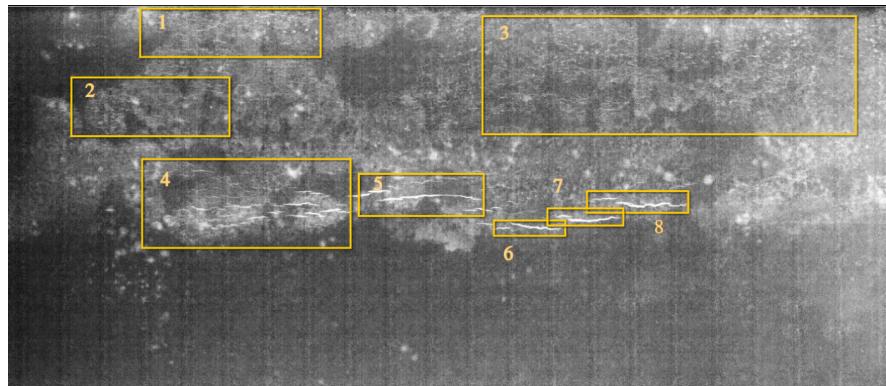


FIGURE 2.8 – Full depth map of the sample

In Figure 7 we can see a high resolution version of region 2. It is possible to see first hand the effect of corrosion on the images, as a kind of white cloud that envelops the cracks.

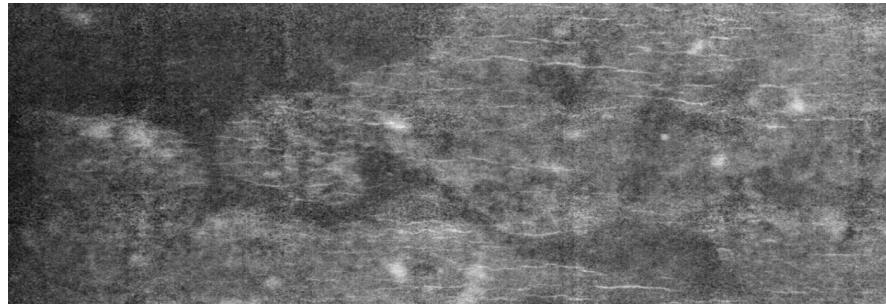


FIGURE 2.9 – Zoomed depth map of region 2

Table 2.2 compares the data we measured with data obtained from an Eddy Current analysis provided by the same NDT company that gave us the samples to see where our results stand

against other techniques. Unfortunately we were not able to have the real depth measurement to test our data, as it would have to be taken with a destructive evaluation technique and the samples were not our own. In table 2.2 we will see the maximum depth data obtained from X-Ray for each of the defined regions in Figure 2.8.

Region #	Maximum Depth	Maximum Depth with corrosion correction
1	(1.000 ± 0.090) mm	(1.764 ± 0.127) mm
2	(0.981 ± 0.091) mm	(1.771 ± 0.131) mm
3	(1.127 ± 0.140) mm	(1.959 ± 0.186) mm
4	(1.274 ± 0.125) mm	(2.102 ± 0.185) mm
5	(1.964 ± 0.144) mm	(2.813 ± 0.190) mm
6	(1.289 ± 0.086) mm	(2.092 ± 0.120) mm
7	(1.368 ± 0.104) mm	(2.195 ± 0.135) mm
8	(1.696 ± 0.100) mm	(2.525 ± 0.129) mm

TABLE 2.2 – SCC Depth for each of the defined regions

3D depth map

We were also able to produce a 3D depth map of the cracks. Since the corrosion correction is now mostly done by hand and is local to each crack, the results can be seen in figures 2.10 and 2.11. The images were rescaled for a better view and are only qualitative.

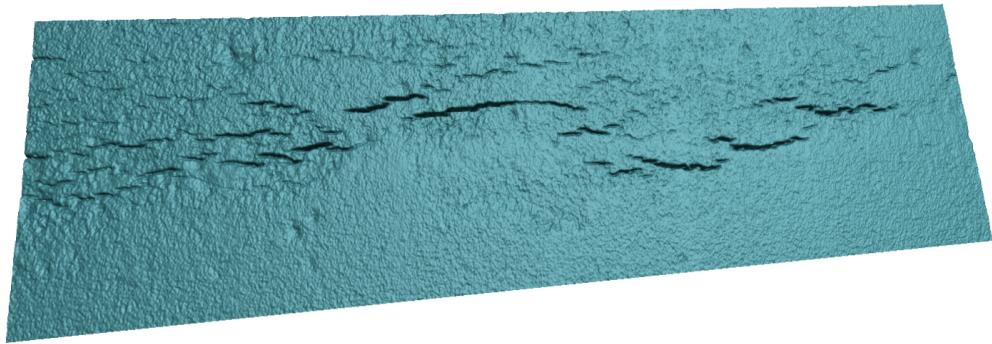


FIGURE 2.10 – Overhead view of the 3D depth map

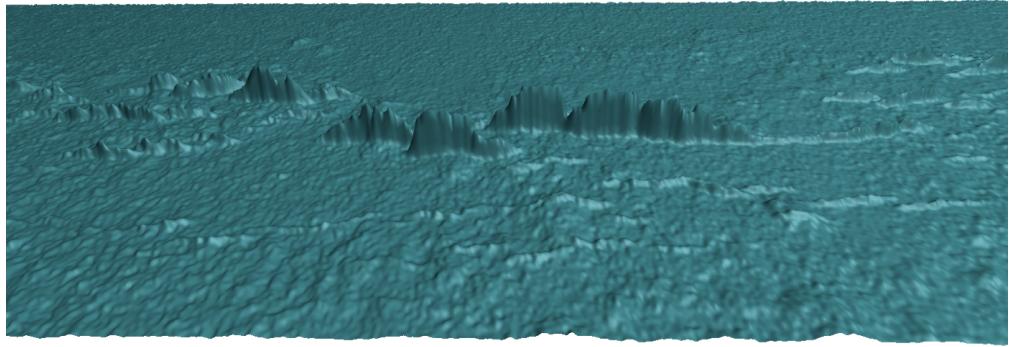


FIGURE 2.11 – Underneath view of the 3D depth map

2.7 Discussion

2.7.1 Precision and accuracy of the results

Comparison to other methods

To verify the validity of our results we compared them to results obtained from an Eddy Current analysis. Figure 2.12 shows a depth map from this analysis and Table 2.3 shows the values for the two methods side by side. It should be noted that the Eddy Current method cannot go deeper than 3 mm, that's why results deeper than that will be noted as 3+ mm.

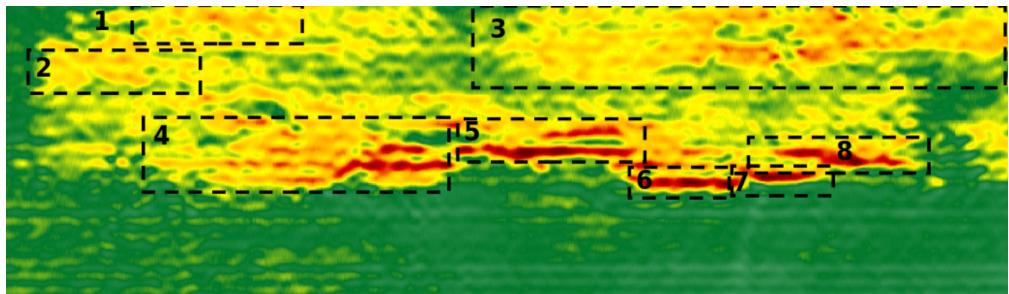


FIGURE 2.12 – Eddy current analysis depth map

Region #	This article	Eddy current	Difference
1	1.764 mm	1.0 mm	+0.764 mm
2	1.771 mm	0.9 mm	+0.871 mm
3	1.959 mm	1.3 mm	+0.659 mm
4	2.102 mm	2.4 mm	-0.298 mm
5	2.813 mm	3.0+ mm	-0.187 mm (+)
6	2.092 mm	2.2 mm	-0.108 mm
7	2.195 mm	2.5 mm	-0.305 mm
8	2.525 mm	3.0+ mm	-0.475 mm (+)

TABLE 2.3 – Comparison between our data and Eddy Current analysis

2.7.2 Error analysis

In this part, we will review the factors that impacted our results and discuss their implications.

Shape of samples

An error factor that came up right at the start is the fact that the samples, coming from a pipeline, were having an ellipsoidally curved shape. While we used image stitching to reduce the effect of the cone beam divergence, we couldn't find a stable way to place the samples so that the beam crossed the exact same amount of material in each parts of the stitched image. This is especially true when trying to correct for corrosion on the up and down edges of the plate. It can be seen as the overshoot in the data comparisons for regions 1, 2 and 3. We usually come to find shallower cracks than Eddy Current analysis.

Orientation of cracks

Since X-Ray imaging is basically a measure of the path length of the beam in the sample, finding the perfect orientation of the sample for the beam to reach the bottom of the cracks was a challenge in itself. That's why we used the cone beam in combination with the linear stage to get a series of different viewing angles to find the optimal view that would provide the deepest measurement for any given region. However, any crack that propagate at an angle that exceeds the maximum angle of the cone beam (i.e. +/- 22.5 degrees) would yield greater depth measurement errors.

Penumbra width and blurring

By placing the samples near the source we had a great advantage in resolution because of the intrinsic geometrical magnification of the system. However, this has also the adverse effect of widening the penumbras of the contrast changes in the images and ultimately blurring the images. Nevertheless, the overall quality of the resulting x-ray images and the fact that we were able to distinguish very small thin cracks from the background with very sharp edges demonstrates that blurring did not have much of an effect in this case.

Thickness calibration errors

While our experimental setup and image cleaning techniques enabled us to acquire very repeatable data, it is clear that the conversion from gray value to intensity to thickness is prone to errors. Shot noise amplitude variations originating from a change in temperature of the combination scintillator-detector, ray-angle distribution within a sub-image used to create the stitched image and machining errors are all examples of what could go wrong with the thickness calibration. That's why we used the distribution of depths within a ROI and repeated measurement and analysis to get the statistics and compute the uncertainties shown above.

2.8 Conclusions

In conclusion, we were able to come up with an intensity to thickness curve that was self-consistent and repeatable. Since it was based on a gray value distribution, it provided statistics for error assessment and helped us to see the effect of parameter changes. We were able to use the best parameters for this study and test our thickness curve on a known-depth sample to assess its accuracy and precision. We then analysed real pipeline samples and found out the corrosion was clouding our results. By using deterministic radiation physics equations we were able to find a way to correct the depth of the cracks that were clouded by corrosion.

Our measurements were coherent with the Eddy Current analysis but delivered much more spatial resolution and could resolve cracks that were very close together. We think that the methods shown in this article are precise and repeatable enough to pave the way towards a calibration standard for the measurement of SCC crack depths in pipelines that does not involve sample destruction. In the future, we would like to use computer vision to build an algorithm that does the corrosion correction automatically. We also want to automate the whole pipeline sample scanning procedure and analysis so that anyone could easily use this method. Once the procedure is automated we intend to proceed with thorough testing with different materials and levels of corrosion. Finally, we would like to use destructive testing on a few samples to confirm our results and potentially find details that might have been overlooked.

2.9 Acknowledgements

For the equipment, the use of custom made software and the financial support we would like to thank :

LynX Inspection Inc.

www.lynxinspection.com

For the opportunity, the samples and the Eddy Current analysis we want to thank :

EddyFi Technologies

www.eddyfi.com

I want to thank all the coworkers at LynX that helped with this research : Martin Lacasse, Dominique Boutet, Roger Booto, Charles Brillon and Vincent Boulet.

Chapitre 3

Simulation d'images rayons x

Dans le chapitre 2, il a été question d'un article sur l'utilisation quantitative de la radiographie pour déterminer la profondeur de fissures dans des échantillons de pipelines. La méthode utilisées implique la calibration du système d'acquisition d'images ainsi que la génération d'une table de valeurs de gris en fonction de la profondeur. Pour générer la table, nous avons utilisé une pièce de calibration en forme d'escalier. Ces méthodes étaient faciles à utiliser puisque les échantillons présentaient une surface plutôt plane. Il était donc possible d'appliquer la table de profondeur uniformément sur l'image. Pour pouvoir inspecter correctement des pièces plus complexes et obtenir leur table, nous avons développé un algorithme de simulation dans le langage CUDA de la compagnie NVIDIA [18].

3.1 Physique des rayons x

Afin de bien comprendre comment simuler une image radiographique, il est important de comprendre comment elle est formée. Dans cette section nous allons voir les principes derrière la génération et l'atténuation des rayons x, ayant déjà couvert la détection au chapitre 1.

3.1.1 Génération

Pour un tube rayons x, le faisceau est généré en bombardant une anode de tungstène avec des électrons accélérés dans une différence de potentiel. Ces électrons finissent par arracher d'autres électrons aux atomes de l'anode et plusieurs réactions se produisent. Nous allons couvrir les deux plus importantes.

Rayons x caractéristiques

Les électrons dans les atomes sont distribués sur différents niveaux d'énergie, aussi appelées couches électroniques. Plus un électron est près de l'atome, plus il faut d'énergie pour pouvoir le faire bouger. L'énergie de liaison E_l des électrons dépend du nombre de protons présent

dans le noyau Z , et donc de l'élément lui-même, comme il est possible de le voir aux figures 3.1 et 3.2.

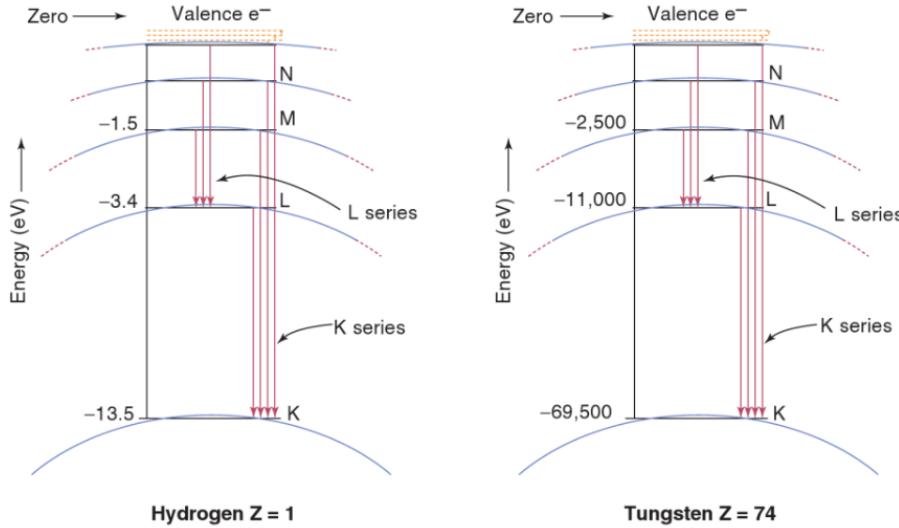


FIGURE 3.1 – Couches électroniques pour l'hydrogène et le tungstène [6]

Lorsque les électrons passent d'un niveau énergétique plus élevé à un plus bas ils émettent de la radiation sous forme de lumière visible, d'ultraviolets ou de rayons x. L'énergie émise lors de ces événements dépend de la différence entre l'énergie de liaison des deux couches impliquées dans le phénomène.

$$E_{rx} = E_l \text{ vacant} - E_l \text{ transient} \quad (3.1)$$

Donc, pour le tungstène, une transition entre les couches M et K pourrait donner le résultat suivant :

$$E_{rx} = 69.5 \text{ keV} - 2.5 \text{ keV} = 67 \text{ keV} \quad (3.2)$$

Cette énergie peut être émise directement sous forme de photon ou elle peut être transmise à un électron sur une couche plus élevée qui sera ensuite éjecté de l'atome. Il s'agit alors d'un électron d'Auger, comme il est possible de le voir à la figure 3.2.

Bremsstrahlung

Le bremsstrahlung ou rayonnement continu de freinage est un rayonnement émis lorsqu'une particule chargée subit une accélération. Dans notre cas, l'anode est bombardée par des électrons et ces électrons interagissent avec la charge positive du noyau atomique. De la radiation est émise lorsqu'ils sont déviés par cette charge, comme il est possible de le voir à la figure 3.3.

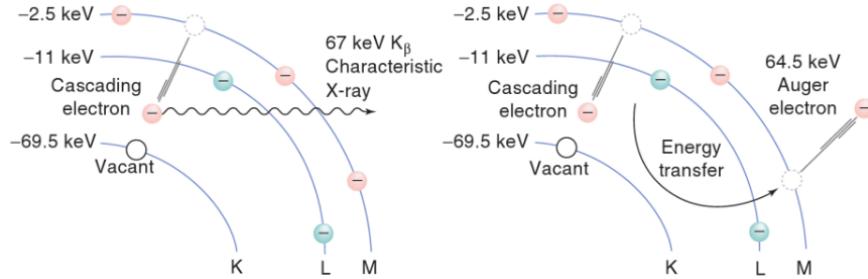


FIGURE 3.2 – Interactions entre les couches électroniques de l'atome [6]

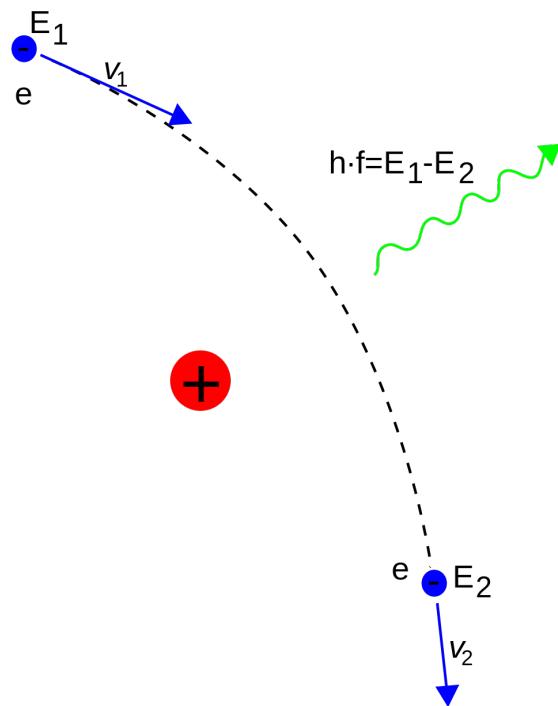


FIGURE 3.3 – Rayonnement continu de freinage

L'énergie maximale des photons émis est donc l'énergie cinétique initiale de l'électron E_0 et elle dépend de la tension appliquée dans le tube rayons x.

3.2 Atténuation

Lorsque le faisceau de rayons x pénètre un objet, il n'interagit pas de la même manière que la lumière visible. Plusieurs interactions se produisent pour l'atténuer. C'est avec la différence d'atténuation entre la pièce et l'air que l'image est formée. Les trois interactions atténuantes principales, soient l'effet photoélectrique, l'effet Compton et la production de paires, dépendent de l'énergie des photons incidents. À l'énergie qui nous concerne, la production de paires n'a aucune incidence. Il est possible de voir leurs domaines d'interaction en fonction de l'énergie

et du nombre de protons effectif Z_{eff} dans la figure 3.4.

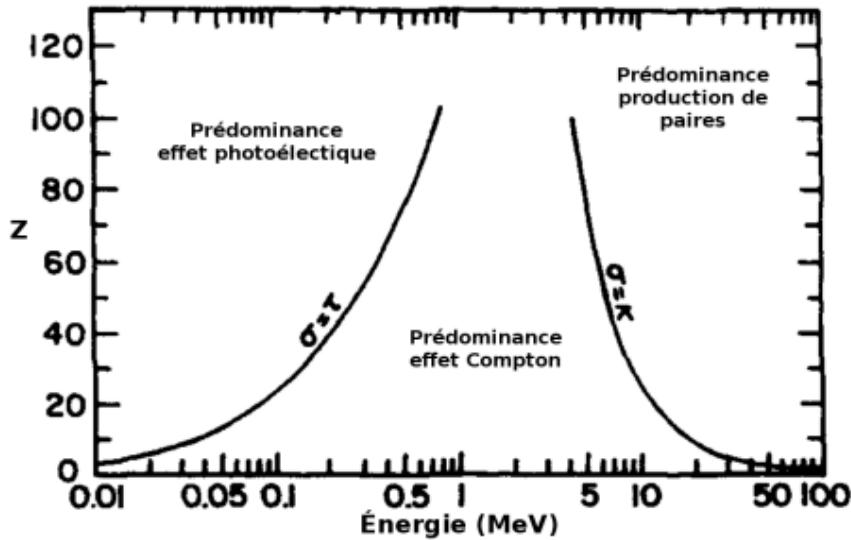


FIGURE 3.4 – Domaine des interactions en fonction de l'énergie des photons et du Z_{eff} du matériau [1]

3.2.1 Diffusion Rayleigh

La diffusion Rayleigh est une interaction élastique. C'est-à-dire qu'elle n'occasionne pas la perte d'énergie d'un photon. Elle n'est donc pas responsable de l'atténuation du faisceau. Le photon interagit avec les électrons de l'atome et sa direction est changée. Il est important de la mentionner, car elle constitue une source de perte de contraste dans les images.

3.2.2 Effet Compton

L'effet Compton est la version inélastique de la diffusion Rayleigh. Lorsqu'un photon frappe un électron avec assez d'énergie, cet électron est éjecté du nuage électronique et le photon continue sa course dans le matériau avec un angle différent de l'angle d'incidence. À force de frapper des électrons, le photon est finalement complètement atténué.

3.2.3 Effet photoélectrique

Lors d'une interaction photoélectrique, le photon transmet l'entièreté de son énergie à l'électron qu'il frappe. Si cette énergie est plus élevée que l'énergie de liaison de l'électron, il est éjecté de l'atome. Ce phénomène peut alors mener à l'émission de rayons X caractéristiques ou d'électrons Auger.

3.2.4 Intensité du faisceau

Il est possible de modéliser l'atténuation d'un faisceau rayons x en fonction de la distance parcourue dans le matériau. Supposons un faisceau de rayons x ayant une intensité initiale I_0 . Il est possible de dire que l'intensité résultante I de toute ces interactions avec la matière en fonction de la longueur du trajet x est

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.3)$$

ou μ est le coefficient d'atténuation linéaire [13] et x est la longueur parcouru par les photons dans le matériau. Évidemment, la source de radiation offre un spectre de longueurs d'onde qui auront chacune leur effet sur l'intensité finale. Il est donc possible d'écrire la contribution de toutes ces énergies pour un seul matériau comme

$$I_0 e^{-\mu x} = I_0 \sum_{j=1}^n w_j e^{-\mu_j x} \quad (3.4)$$

ou les w_j sont les poids des différentes énergies dans le faisceau et les μ_j sont les coefficients d'atténuation correspondants à ces énergies. Nous n'irons pas plus loin dans le cadre de cette recherche, car ce qui est le plus important pour nous est le calcul de la distance traversée dans la pièce.

3.2.5 Calcul des distances parcourues

Pour produire une image simulée de la pièce, il faut connaître l'atténuation subite par le faisceau dans la pièce. Tel que mentionné précédemment, l'atténuation de l'intensité dépend de la longueur parcourue par les rayons x dans le matériau atténuant. La méthode choisie dans le cadre de cette recherche est le tracé de rayon. Dans les prochaines sections nous allons voir les étapes ayant mené au simulateur comme il est dans son état actuel.

3.3 Algorithme de Siddon

La première version de l'algorithme a été programmée en suivant une méthode améliorée de l'algorithme proposée par Robert L. Siddon en 1984 [20, 21]. Dans cette méthode, la pièce et l'espace l'entourant sont séparé en petits cubes appelés voxels. Les voxels appartenant à la pièce auront un poids de 1 et le reste 0. Au lieu de considérer ces éléments individuellement, ils sont considérés comme les volumes d'intersection d'une série de plans parallèles également espacés, comme il est possible de le voir à la figure 3.5.

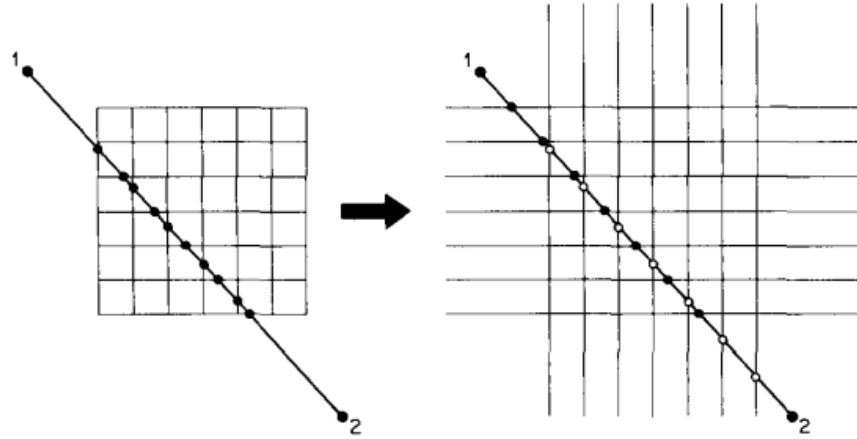


FIGURE 3.5 – Visualisation des voxels comme une série de plans parallèles [20]

Afin d'alléger le texte, nous allons continuer dans un espace en 2D, comme dans l'article, tout en sachant que les équations peuvent facilement s'étendre à la troisième dimension. Pour une matrice de voxels, les ensembles orthogonaux de plans parallèles peuvent s'écrire :

$$\begin{aligned} X_{\text{plan}}(i) &= X_{\text{plan}}(1) + (i - 1)d_x \quad (i = 1, \dots, N_x) \\ Y_{\text{plan}}(i) &= Y_{\text{plan}}(1) + (i - 1)d_y \quad (i = 1, \dots, N_y) \end{aligned} \quad (3.5)$$

ou d_x , d_y et d_z sont les distances entre les plans dans les trois dimensions et aussi la dimensions des voxels en 3D. Ensuite nous traçons un rayon entre la source et chacun des pixels du détecteur. Nous paramétrisons les intersections de ces rayons en fonction de la distance parcourue dans l'espace et obtenons ainsi une série de valeurs *alpha* comme :

$$\alpha_x(N_x) = [X_{\text{plan}}(N_x) - X_1]/(X_2 - X_1) \quad (3.6)$$

Avec des expressions similaires pour α_y . Nous suivons donc une représentation paramétrique du rayon :

$$\vec{p}_{12} = \begin{cases} \vec{p}_x(\alpha) = p_{1x} + \alpha(p_{2x} - p_{1x}) \\ \vec{p}_y(\alpha) = p_{1y} + \alpha(p_{2y} - p_{1y}) \end{cases} \quad (3.7)$$

Il faut maintenant trouver les points d'entrée ($\alpha = \alpha_{\min}$) et de sortie ($\alpha = \alpha_{\max}$) de l'espace de voxels. Nous aurons donc :

$$\begin{aligned}\alpha_{min} &= \max(\alpha_{xmin}, \alpha_{ymin}) \\ \alpha_{max} &= \min(\alpha_{xmax}, \alpha_{ymax})\end{aligned}\tag{3.8}$$

avec

$$\begin{aligned}\alpha_{xmin} &= \min(\alpha_x(0), \alpha_x(N_x - 1)) \\ \alpha_{xmax} &= \max(\alpha_x(0), \alpha_x(N_x - 1)) \\ \alpha_{ymin} &= \min(\alpha_y(0), \alpha_y(N_y - 1)) \\ \alpha_{ymax} &= \max(\alpha_y(0), \alpha_y(N_y - 1))\end{aligned}\tag{3.9}$$

Et pour un plan i, j donné, nous aurons :

$$\begin{aligned}\alpha_x(i) &= \frac{(b_x + id_x) - p_{1x}}{p_{2x} - p_{1x}} \\ \alpha_y(j) &= \frac{(b_y + jd_y) - p_{1y}}{p_{2y} - p_{1y}}\end{aligned}\tag{3.10}$$

ou b_x, b_y sont la position de l'origine de l'espace de voxel. Le reste de l'algorithme est plutôt simple. À partir des plans du point d'entrée, il suffit de calculer les valeurs de α_x et α_y des prochains plans interceptant le rayon, de trouver la valeur minimale de celles-ci et d'itérer dans cette direction. Il est ensuite facile de connaître la longueur traversée dans le voxel, puisque nous sommes paramétrisés sur la longueur totale du rayon :

$$\delta_L = (\alpha_n - \alpha_{n-1}) \cdot \|\vec{p}_2 - \vec{p}_1\| \tag{3.11}$$

Pour des applications médicales, ceci permet d'appliquer une matrice de valeurs d'atténuation et de densités à chacune des longueurs traversées dans chacun des voxel et, ultimement, de calculer la distance radiologique, qui correspond à l'intégrale de ligne pondérée par l'atténuation d'un milieu normalisé sur l'atténuation de l'eau. Les itérations continuent donc de cette manière jusqu'à ce que le point p_2 soit atteint.

3.3.1 Utilisation et performance

Il est possible de constater que le nombre d'opérations nécessaires pour effectuer le calcul avec cet algorithme dépend de la taille de l'espace de voxels, de la résolution de ces voxels ainsi que du nombre de rayons à simuler. Dans notre cas, le détecteur utilisé donne des images d'une taille de 3104x3096 pixels, avec une résolution de 100 microns par pixel. Il faut aussi

penser à transformer le modèle de la pièce pour qu'elle fonctionne avec un espace de voxel. Pour se faire, nous avons utilisé une librairie de visualisation et de traitement de données 3D appelée VTK [16]. Nous avons plus spécifiquement utilisé l'exemple qui permet de passer du "PolyData" au "ImageData" [9]. Le "PolyData" étant la classe de base qui permet de lire le fichier de la pièce, et le "ImageData" étant la classe qui permet de contenir une image, et donc, par extension, un espace de voxels. Le prototype a donné des résultats intéressants, mais plusieurs problèmes ont fait en sorte que nous avons décidé de le laisser tomber. Nous avons utilisé un modèle en forme de tube avec des demi-sphères coupées de l'intérieur pour faire ressortir les erreurs. Voici un résumé de ces problèmes :



FIGURE 3.6 – Vue complète d'un tube

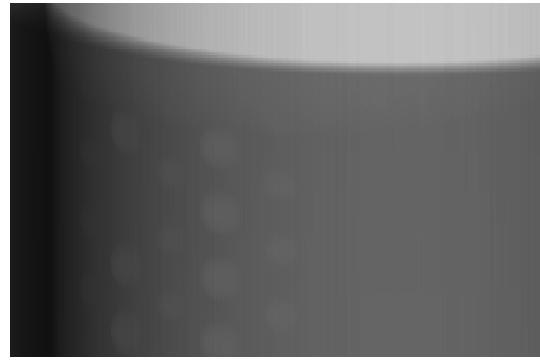


FIGURE 3.7 – Vue de près du tube

- Problèmes liés à la transformation de la pièce du format stéréolithographique à un espace de voxels
- Mauvais échantillonnage des courbes de la pièce dépendant très fortement de la résolution de l'espace de voxels, comme il est possible de le voir aux figures 3.7, 3.8 et 3.9.
- Temps de calcul devenant beaucoup trop long pour de grandes pièces, même s'il est possible de réutiliser l'espace de voxels
- Les pièces ayant des surfaces ouvertes présentent une difficulté de plus
- Problèmes liés au calcul des distances parcourues
 - Erreur de calcul aléatoires dépendante de la résolution de l'espace de voxel, de la position de l'objet dans l'espace ainsi que de la précision maximale des nombres à valeurs flottantes, comme il est possible de le voir à la figure 3.6
 - Temps de calcul beaucoup trop long pour le détecteur utilisé (3104x3104 pixels), même en utilisant la librairie parallèle CUDA [18]
 - Il est possible de voir le temps de calcul pour 21 images avec une résolution de 1000x1000 pixels à la figure 3.10

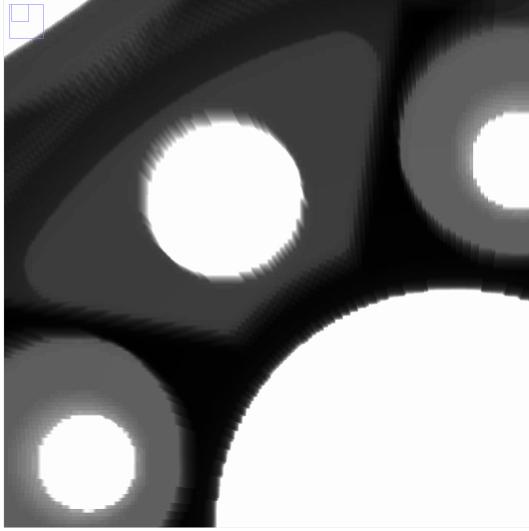


FIGURE 3.8 – Vue d'une jante simulée

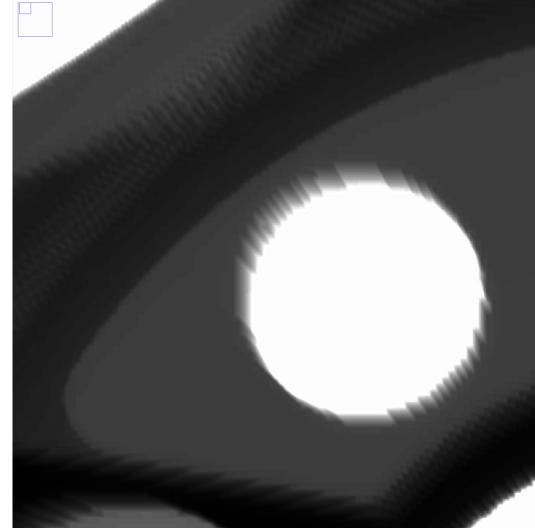


FIGURE 3.9 – Vue de près de la jante

```
PS C:\LynX_Utilities\xraysim_gen_20180809> ./xraysim_gen_cpu.exe sample\TP015_Config.xml TP015_
Loading config sample\TP015_Config.xml...Voltage=120kV, Current=200muA...Done.
Simulating step 1 of 21...Done in 49.4477s in file: .\simulated\TP015_000_0001 timeLeft: 16min28s
Simulating step 2 of 21...Done in 52.2532s in file: .\simulated\TP015_000_0002 timeLeft: 16min6s
Simulating step 3 of 21...Done in 55.1282s in file: .\simulated\TP015_000_0003 timeLeft: 15min41s
Simulating step 4 of 21...Done in 56.8229s in file: .\simulated\TP015_000_0004 timeLeft: 15min8s
Simulating step 5 of 21...Done in 57.9725s in file: .\simulated\TP015_000_0005 timeLeft: 14min29s
Simulating step 6 of 21...Done in 56.3382s in file: .\simulated\TP015_000_0006 timeLeft: 13min49s
Simulating step 7 of 21...Done in 58.2663s in file: .\simulated\TP015_000_0007 timeLeft: 12min52s
Simulating step 8 of 21...Done in 59.4747s in file: .\simulated\TP015_000_0008 timeLeft: 12min4s
Simulating step 9 of 21...Done in 60.2726s in file: .\simulated\TP015_000_0009 timeLeft: 11min14s
Simulating step 10 of 21...Done in 60.8838s in file: .\simulated\TP015_000_0010 timeLeft: 10min23s
Simulating step 11 of 21...Done in 62.1427s in file: .\simulated\TP015_000_0011 timeLeft: 9min31s
Simulating step 12 of 21...Done in 62.3882s in file: .\simulated\TP015_000_0012 timeLeft: 8min38s
Simulating step 13 of 21...Done in 66.2203s in file: .\simulated\TP015_000_0013 timeLeft: 7min46s
Simulating step 14 of 21...Done in 69.7301s in file: .\simulated\TP015_000_0014 timeLeft: 6min53s
Simulating step 15 of 21...Done in 77.9035s in file: .\simulated\TP015_000_0015 timeLeft: 6min2s
Simulating step 16 of 21...Done in 82.2312s in file: .\simulated\TP015_000_0016 timeLeft: 5min8s
Simulating step 17 of 21...Done in 75.2669s in file: .\simulated\TP015_000_0017 timeLeft: 4min10s
Simulating step 18 of 21...Done in 72.3922s in file: .\simulated\TP015_000_0018 timeLeft: 3min9s
Simulating step 19 of 21...Done in 69.8476s in file: .\simulated\TP015_000_0019 timeLeft: 2min6s
Simulating step 20 of 21...Done in 67.5457s in file: .\simulated\TP015_000_0020 timeLeft: 1min3s
Simulating step 21 of 21...Done in 63.2808s in file: .\simulated\TP015_000_0021 timeLeft: 0min0s
PS C:\LynX_Utilities\xraysim_gen_20180809>
PS C:\LynX_Utilities\xraysim_gen_20180809> date
5 avril 2020 15:22:29
PS C:\LynX_Utilities\xraysim_gen_20180809>
PS C:\LynX_Utilities\xraysim_gen_20180809>
```

FIGURE 3.10 – Temps de calcul pour 21 images avec une résolution de 1000x1000 pixels

3.4 Algorithme d'intersection de Möller-Trumbore

Lorsque nous travaillons encore sur l'algorithme de Siddon, nous cherchions un moyen d'accélérer le processus de voxélisation, puisque plusieurs pièces étaient de grandes tailles et cela prenait beaucoup de temps. Nous cherchions donc un moyen de tracer des rayons au travers de la pièce et de trouver les points d'entrée et de sortie pour bien définir les voxels qui feraient partie de la pièce. Nous avons trouvé un algorithme d'intersection entre un rayon et un triangle appelé algorithme de Möller-Trumbore [17]. L'article montre une méthode rapide avec peu d'empreinte mémoire pour effectuer ce calcul. Après une très courte réflexion, nous avons décidé d'implémenter une variante de cet algorithme pour remplacer celui de Siddon. En se référant à l'article et en utilisant la même notation, c'est à dire que les majuscules sont des vecteurs et les minuscules sont des scalaires, nous commençons avec un rayon $R(t)$ ayant une origine O et normalisé dans la direction D tel que

$$R(t) = O + tD \quad (3.12)$$

et un triangle étant composé de trois sommets V_0 , V_1 et V_2 . Un point $T(u, v, w)$ en coordonnées barycentriques sur un triangle est défini comme

$$T(u, v, w) = uV_1 + vV_2 + wV_0 \quad (3.13)$$

Les scalaires (u, v, w) doivent par contre répondre à la condition suivante : $u + v + w = 1$. Ce qui nous permet d'exprimer le point seulement en fonction de deux valeurs (u, v) de cette manière :

$$T(u, v) = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2 \quad (3.14)$$

où (u, v) doivent respecter $u \geq 0$, $v \geq 0$ et $u + v \leq 1$. Calculer l'intersection entre le rayon $R(t)$ et le triangle $T(u, v)$ est équivalent à $R(t) = T(u, v)$, ce qui donne

$$O + tD = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2 \quad (3.15)$$

En réarrangeant les termes, nous obtenons

$$-tD + u(V_1 - V_0) + v(V_2 - V_0) = O - V_0 \quad (3.16)$$

Et donc

$$\begin{bmatrix} -D, & V_1 - V_0, & V_2 - V_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = O - V_0 \quad (3.17)$$

Ceci veut dire que les coordonnées barycentriques (u, v) et la distance t , de l'origine du rayon jusqu'au point d'intersection peuvent être trouvées en solutionnant le système d'équations linéaire donné par cette équation. Ceci peut se traduire géométriquement par une translation du triangle à l'origine et ensuite une transformation en triangle unitaire en y, z avec la direction du rayon dans la direction des x , comme il est possible de le voir à la figure 3.11 où $M = [-D, V_1 - V_0, V_2 - V_0]$ est la matrice dans l'équation 3.17.

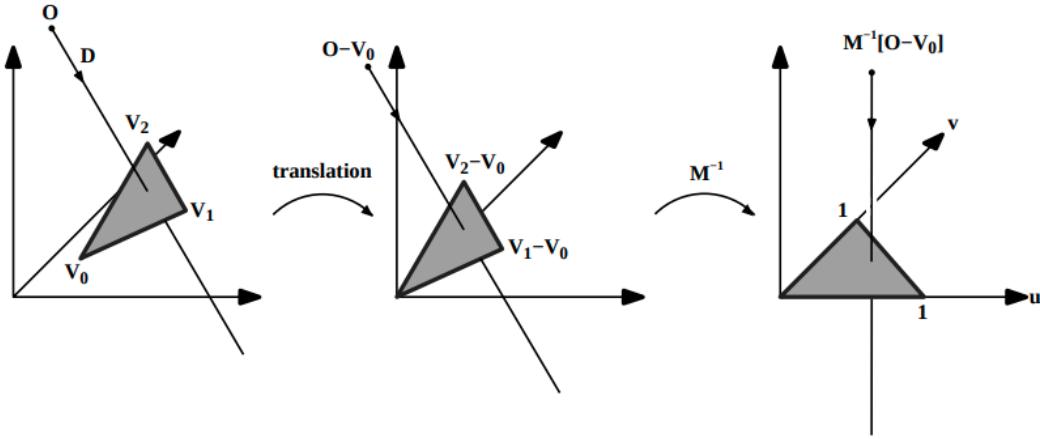


FIGURE 3.11 – Translation et normalisation du triangle [17]

En dénotant $E_1 = V_1 - V_0$, $E_2 = V_2 - V_0$ et $T = O - V_0$, la solution de l'équation 3.17 est obtenue en utilisant la méthode de Cramer :

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{|-D, E_1, E_2|} \begin{bmatrix} |T, & E_1, & E_2| \\ |-D, & T, & E_2| \\ |-D, & E_1, & T| \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Nous savons qu'en algèbre linéaire, $|A, B, C| = -(A \times C) \cdot B = -(C \times B) \cdot A$, nous pouvons donc réécrire 3.18 comme

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{(D \times E_2) \cdot E_1} \begin{bmatrix} (T \times E_1) \cdot E_2 \\ (D \times E_2) \cdot T \\ (T \times E_1) \cdot D \end{bmatrix} = \frac{1}{P \cdot E_1} \begin{bmatrix} Q \cdot E_2 \\ P \cdot T \\ Q \cdot D \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

où $P = (D \times E_2)$ et $Q = T \times E_1$, ces facteurs sont réutilisés dans l'implémentation pour accélérer les calculs. Avec cette équation, nous pouvons obtenir les valeurs de t , u et v . Lors

du calcul, nous vérifions si le rayon intercepte le triangle en s'assurant que les deux ne sont pas parallèles, et en regardant si les valeurs de u et v respectent les conditions établies soient $u \geq 0$, $v \geq 0$ et $u + v \leq 1$. Il est ensuite possible de trouver la position du point d'intersection avec l'équation 3.12. Nous répétons ensuite ces vérifications pour chacun des triangles de la pièce et récoltons les points d'intersection. Il suffit ensuite de calculer la distance entre des paires de points d'intersection pour obtenir la distance parcourue par le rayon dans la pièce.

3.4.1 Implémentation sur carte graphique

Évidemment le nombre de calculs requis pour une simulation est très élevé puisque cette méthode demande à chacun des pixels de vérifier l'intersection de son rayon avec chacun des triangles du modèle. La performance étant un enjeu important de cette recherche, nous avons décidé d'utiliser le langage de programmation parallèle CUDA [18] pour produire un prototype. Ceci permet d'utiliser la force de calcul parallèle asynchrone d'une carte graphique pour effectuer beaucoup d'opérations rapidement.

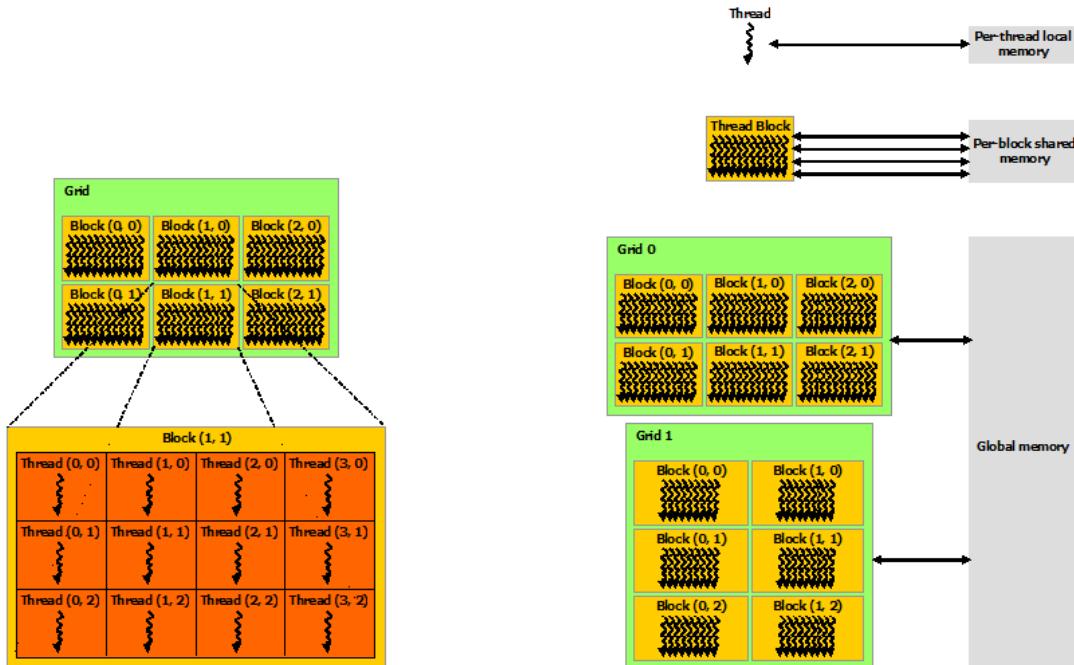


FIGURE 3.12 – Arrangement d'une grille [18] FIGURE 3.13 – Hiérarchie de la mémoire [18]

Pour alléger la description de l'utilisation de ce langage, les noms anglais définissant des structures de calcul importante seront utilisés directement si la traduction est trop complexe. De plus, nous feront référence implicitement aux figures 3.12 et 3.13. La structure de calcul de base de ce langage est un "thread", ou fil. Chacun de ces thread possède sa propre mémoire tampon. Les thread sont organisés en plusieurs blocs 3D partageant une mémoire commune. Cette mémoire, lorsque bien utilisée, permet de réutiliser certaines valeurs propres à un bloc. Les blocs ont tous la même taille définie par l'utilisateur. Dans le manuel, il est recommandé

d'utiliser des tailles qui dépendent de la carte graphique utilisée. Ce sont en général des multiples de 2, comme 32 et 64, par exemple. Les blocs sont ensuite placés dans une grille ayant une taille dépendante du calcul à effectuer. Pour un détecteur faisant 3104x3104 pixels, par exemple, la grille comprendra 97x97 blocs de 32x32 thread, chacun des thread correspondant à un pixel du détecteur. Une fonction appelée "kernel", ou noyau, est effectuée par chacun des thread en parallèle. Dans notre cas, chacun des thread vérifie tous les triangles de la pièce présents dans la mémoire globale. Ils calculent ensuite les distances parcourues et l'algorithme retourne une image des distances parcourues. Une table ou une courbe de valeurs de gris en fonction de l'épaisseur peut ensuite être appliquée pour obtenir l'image. Aux figures 3.6, 3.7, 3.8 et 3.9, par exemple, une courbe exponentielle a été appliquée.

3.4.2 Utilisation

Il est possible de remarquer que pour cet algorithme le nombre de calculs à effectuer est aussi très élevé. Nous avons donc décidé d'optimiser le calcul en filtrant les triangles entrant dans l'algorithme. La méthode la plus facile pour filtrer les triangles est de créer une nouvelle pièce temporaire contenant seulement les triangles qui sont dans le champ de vue entre la source et le détecteur. Puisque nous connaissons la position de notre point focal (position de la source) ainsi que les dimensions du détecteur, nous avons enlevé les triangles qui n'avaient aucun sommet dans le champ de vue, comme il est possible de le voir à la figure 3.14, un triangle formé des points (D, E, F) ou (E, F, G) ne serait pas filtré, alors qu'un formé des points (G, H, I) le serait.

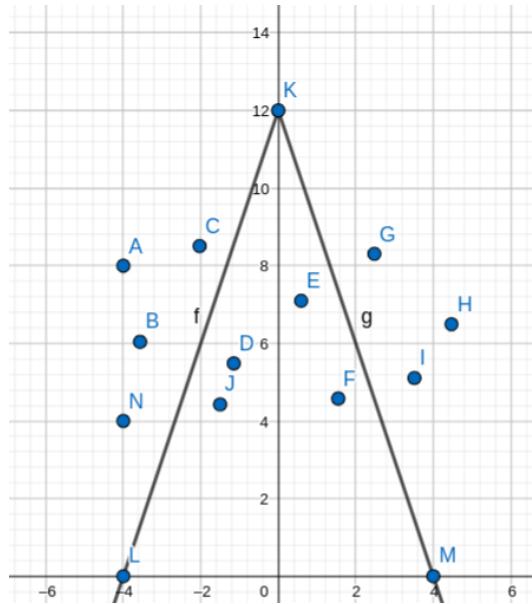


FIGURE 3.14 – Seuls les points D, E, F et J sont dans le champ de vue du détecteur [10]

Avec cet algorithme il a été possible de voir une très bonne amélioration au niveau de la résolution dans les courbes de la pièce. En comparant les figures 3.7 et 3.16 il est possible de

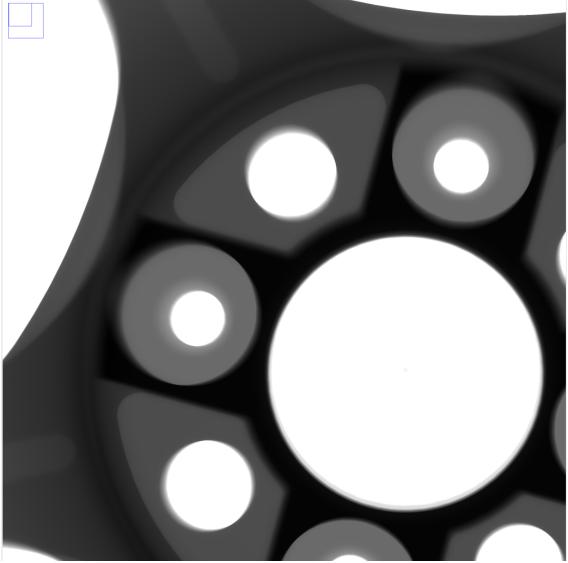


FIGURE 3.15 – Vue d'une jante simulée avec Möller-Trumbore

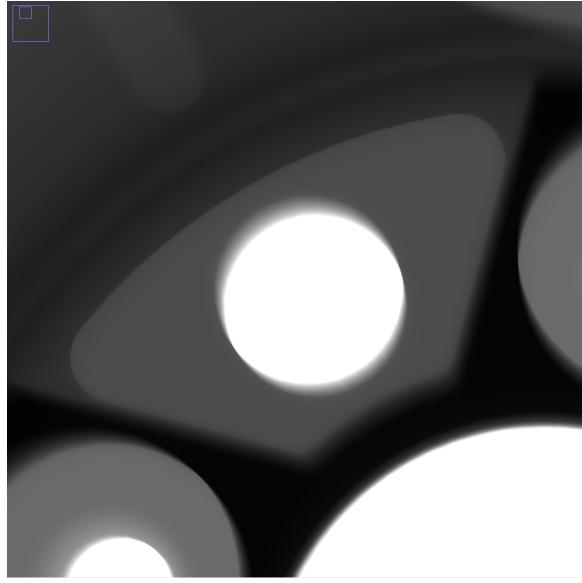


FIGURE 3.16 – Vue de près de la jante

constater l'amélioration dans la résolution des courbes. D'un côté il y a un fort problème avec l'échantillonnage des voxels et de l'autre, la courbe apparaît telle qu'elle est dans le modèle de la pièce. Pour générer ces images, une simple courbe exponentielle a été appliquée aux longueurs de parcours.

3.4.3 Performance

Nous avons effectué quelques tests pour déterminer la performance en fonction du nombre de triangles de la pièce et du nombre de pixels du détecteur. Pour ces tests, nous avons utilisés le modèle de la jante de départ qui contient 331918 triangles et l'avons décimé en utilisant le filtre "Quadric Edge Collapse" du logiciel Meshlab [7]. Ces tests ont été effectués avec une carte graphique GTX 1080ti de Nvidia. Pour chacun des points nous avons effectués 20 simulations. Voici donc les données du temps de calcul en fonction du nombre de triangles de la pièce et celles pour le nombre de pixels du détecteur.

Comme il est possible de le voir à la figure 3.17, le temps de calcul en fonction du nombre de triangles de la pièce est plutôt linéaire. Celui pour les pixels, à la figure 3.18, l'est aussi. Nous n'avons malheureusement pas pu faire une analyse aussi complète avec le simulateur basé sur un espace de voxels, par contre, en regardant la figure 3.10, nous pouvons facilement dire que cette version est beaucoup plus rapide.

# Triangles	Temps(s)
331918	(14.72 ± 0.21)
248938	(9.96 ± 0.30)
165958	(7.46 ± 0.14)
124468	(5.92 ± 0.13)
82978	(3.89 ± 0.10)
62232	(3.05 ± 0.06)
41488	(2.11 ± 0.04)
31116	(1.54 ± 0.09)
20744	(1.13 ± 0.02)

TABLE 3.1 – Temps de calcul en fonction du nombre de triangles

Résolution	# Pixels	Temps(s)
3104x3104	9634816	(14.72 ± 0.21)
3104x1552	4817408	(7.241 ± 0.038)
1552x1552	2408704	(3.631 ± 0.037)
1552x776	1204352	(1.851 ± 0.038)
776x776	602176	(0.9529 ± 0.0079)

TABLE 3.2 – Temps de calcul en fonction du nombre de pixels

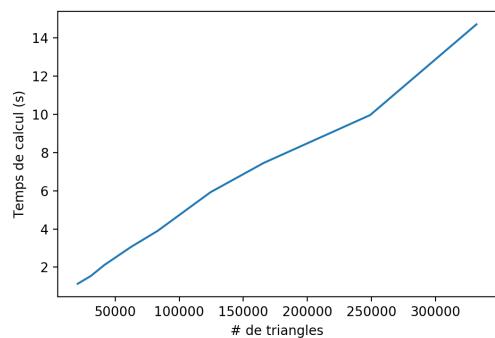


FIGURE 3.17 – Temps de calcul vs. nombre de triangles

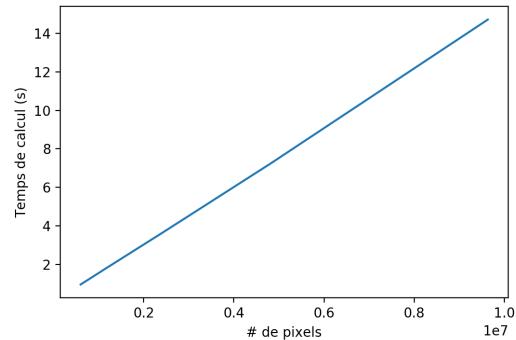


FIGURE 3.18 – Temps de calcul vs. nombre de pixels

Chapitre 4

Application et résultats

Dans ce chapitre, nous allons parler de l'application de la simulation dans un contexte d'inspection industrielle. Il s'agit de la génération d'images de différences entre des images réelles et des images simulées. Cette application est la porte d'entrée vers la reconnaissance assistée de défauts. En effet, elle permet d'obtenir des images qui mettent en évidence les défauts d'une pièce. Nous allons expliquer les étapes qui permettent d'arriver à de telles images et allons montrer le résultat pour une pièce de calibration. La pièce en question est un bloc d'aluminium avec des trous de différentes formes percés à l'intérieur. Nous utiliserons le modèle sans trous de la pièce pour générer des images de différences et faire ressortir les défauts qui y ont été ajoutés. Il est possible de voir le modèle à la figure 4.1. Il n'est pas possible de le voir dans cette image, mais les vis servent à tenir un morceau en forme d'escalier qui contient des trous à fond plat de 0.5 mm, 0.25mm et 0.1mm.

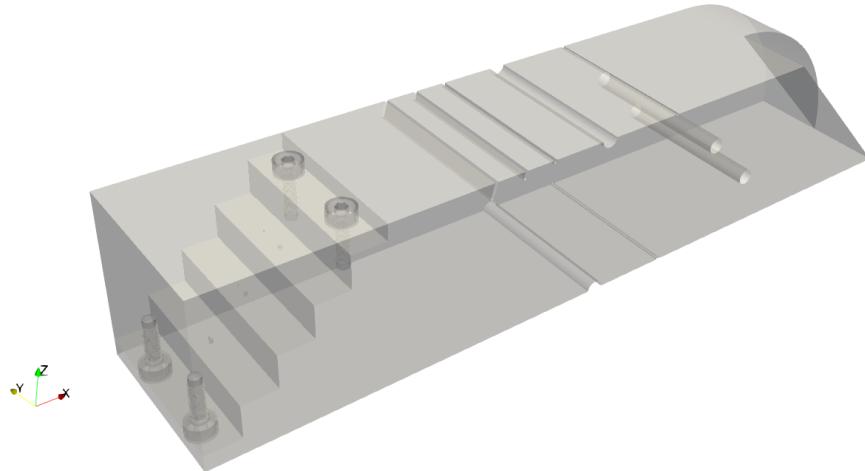


FIGURE 4.1 – Vue de la pièce de calibration utilisée [7]

4.1 Positionnement

Afin de pouvoir faire la différence entre une image réelle et une simulée, il faut tout d'abord être en mesure de simuler la pièce au bon endroit dans l'image. Il faut donc trouver la matrice de transformation pour passer du référentiel du modèle vers celui du simulateur. Nous avons décidé d'utiliser une méthode d'optimisation non-linéaire sur les 6 degrés de liberté de la pièce dans l'espace, soit 3 en translation et 3 en rotation. C'est à dire que nous avons utilisé un algorithme qui génère une image simulée, qui la compare avec l'image réelle et qui retourne une métrique représentant la différence entre les deux images. L'algorithme bouge ensuite la pièce itérativement afin de réduire cette métrique. La détermination de la métrique était donc une partie critique du positionnement de la pièce. Dans notre cas, la distribution des valeurs de gris en fonction des longueurs de parcours n'était pas connue à l'avance, il faut alors utiliser une distribution théorique et trouver une métrique de recalage qui est robuste aux différences de valeurs de gris entre les images. Nous avons développés une métrique qui est maintenant un secret industriel détenu par Lynx Inspection. Cette métrique mesure une distance entre les deux images qu'il faut réduire par optimisation pour bien positionner la pièce. Elle fonctionne bien pour des images ayant des valeurs de gris différentes.

4.2 Obtention des valeurs de gris

Une fois la pièce simulée bien positionnée par rapport à l'image réelle, nous obtenons une représentation des longueurs parcourues en mm, comme il est possible de le voir à la figure 4.2. Dans cette image les distances ont été multipliés par 1000 afin d'avoir une résolution d'un micron par valeur de gris.

Une fois cette représentation obtenue, nous devons trouver la correspondance entre les distances et les valeurs de gris. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées, comme un modèle de courbe ou une table de correspondances. Nous avons décidé d'utiliser une table de correspondances, il est possible de voir un exemple à la figure 4.3. Une fois la table de correspondance appliquée sur l'image simulée, il est possible d'effectuer la soustraction entre les deux images pour faire ressortir les défauts.

4.3 Images résultantes

Il sera maintenant question des images résultantes de ce projet. Lors de ce projet, nous avons effectués des captures radiographiques sur plusieurs pièces. Nous allons commencer par la pièce de calibration présentée plus haut dans ce chapitre.

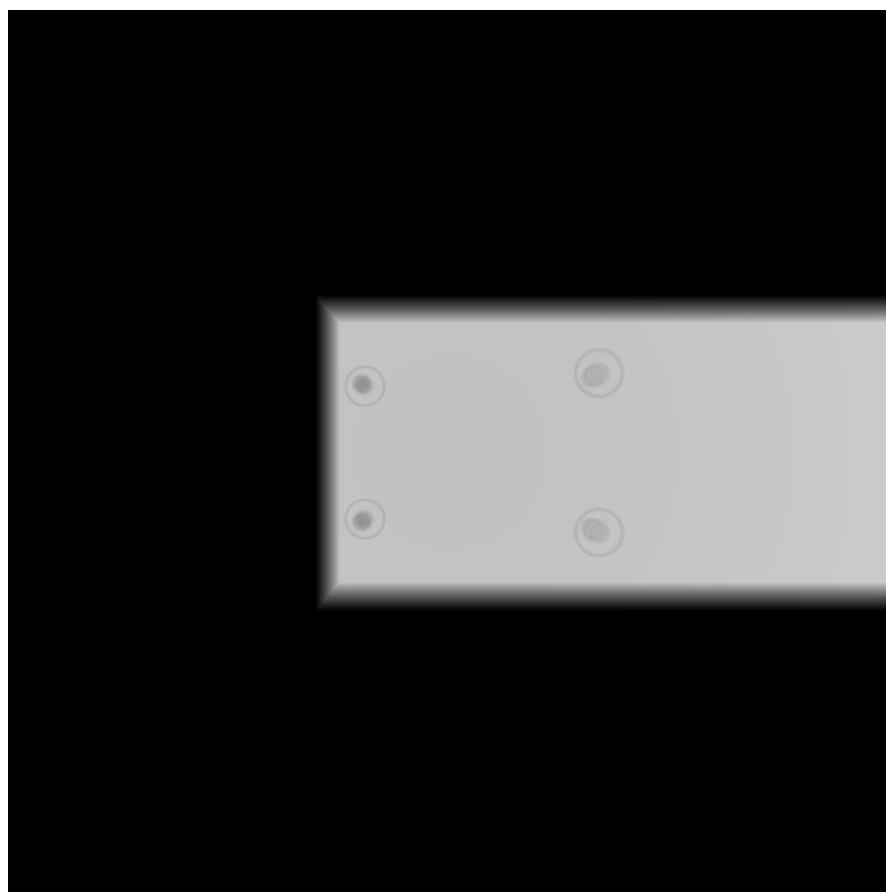


FIGURE 4.2 – Image de longueurs de parcours

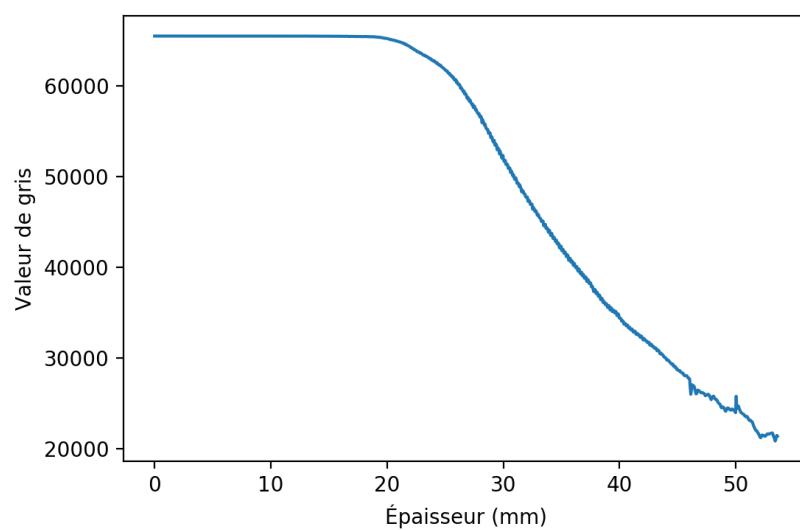


FIGURE 4.3 – Courbe de correspondances entre les épaisseurs et les valeurs de gris

4.3.1 Pièce de calibration

La capture originale de la pièce est visible à la figure 4.4 et l'image de différence produite en comparant l'image réelle et l'image simulée à la figure 4.5. Comme il est possible de le constater les trous à fond plat sont beaucoup plus faciles à identifier directement dans l'image de différence. Il est aussi possible de voir clairement des défauts dans la pièce elle-même. En fait, ces défauts dans la pièce ont été découvert beaucoup plus tard puisqu'avec l'image originale, nous pensions qu'il s'agissait d'artefacts produits par la plaque qui soutenait la pièce, qui était fait en styracousse.

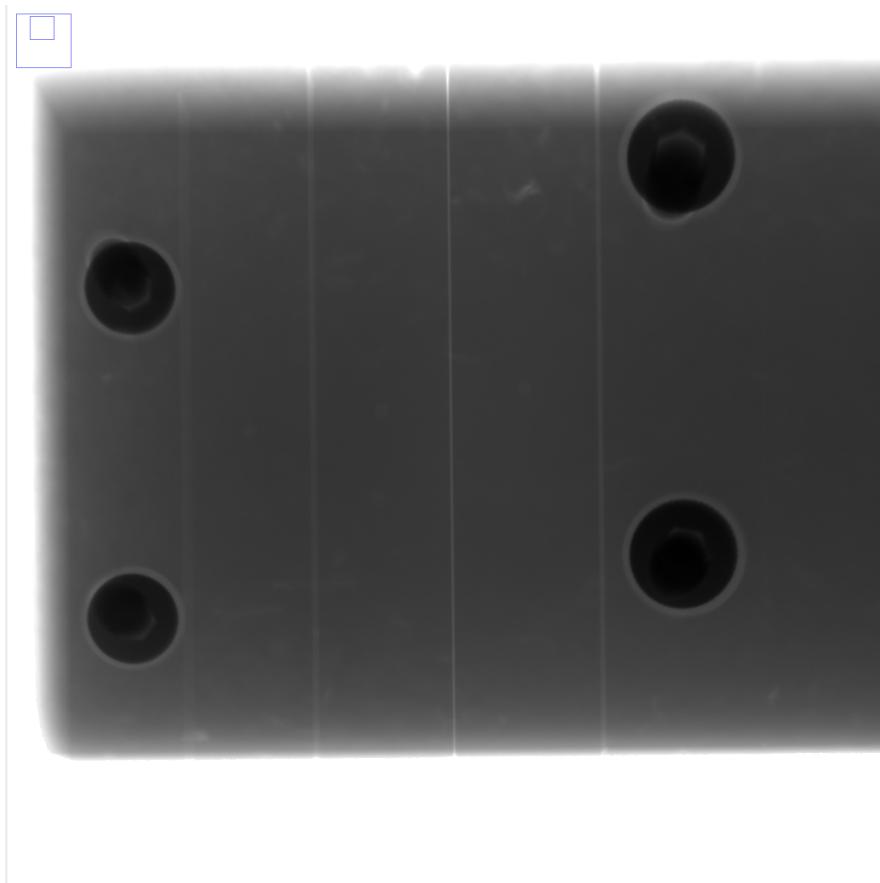


FIGURE 4.4 – Image originale de la pièce de calibration

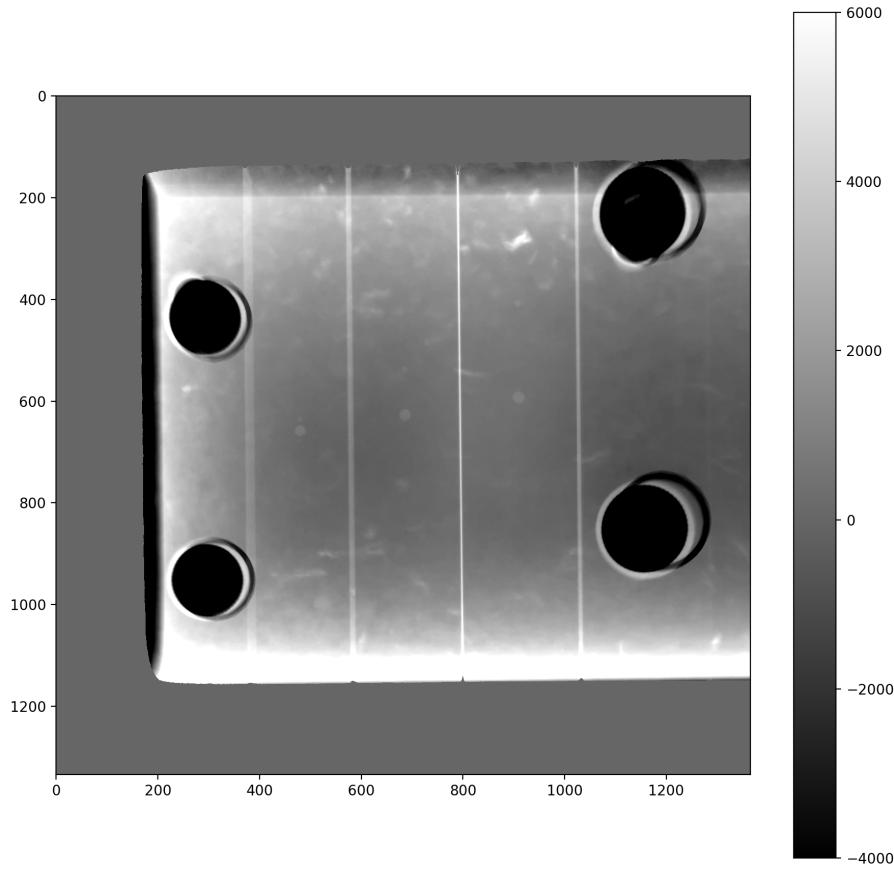


FIGURE 4.5 – Image de différence de la pièce de calibration

4.3.2 Pièce de moteur

D'autres pièces ont aussi été analysés suivant la même méthode, malheureusement la majorité de ces pièces appartiennent à des clients et ne peuvent être dévoilées. Par contre, une pièce provenant d'un moteur de moto qui ne fait pas l'objet de restrictions a servi d'exemple représentatif de la solution cible. Dans la figure 4.6, il est possible de voir l'image radiographique originale, ainsi que celle avec le traitement de différence.

Dans cette image, il est possible de voir que les défauts deviennent beaucoup plus exposés que dans l'image originale. Effectivement, des différences peuvent être vues à la droite du cercle central de la pièce. Il aurait été très difficile de voir ces défauts dans l'image originale, même en affichant avec des seuils de valeurs de gris plus restrictifs. L'avantage de la méthode

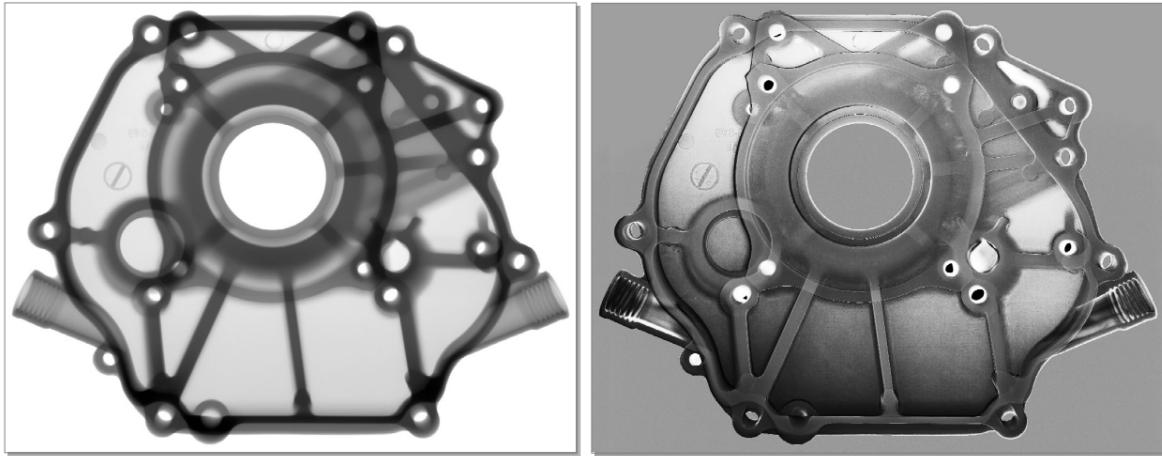


FIGURE 4.6 – Images originales et de différences de la pièce de moteur

de différence d'images est quelle permet de voir des défauts au travers de parties de la pièce ayant des niveau d'exposition différents. En effet, en effectuant ce traitement, nous atténuons l'effet que la différence d'épaisseur a sur l'observation des défauts. Il est possible de voir ce résultat à la figure 4.7.

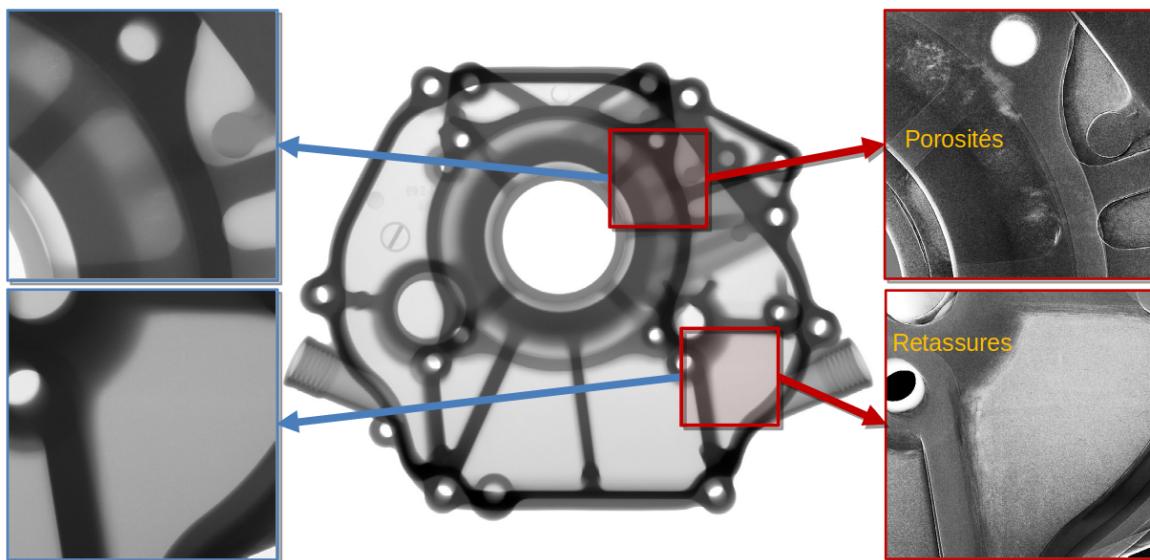


FIGURE 4.7 – Vue de près de l'image de différence

Conclusion

En conclusion, il a été question dans ce mémoire de la radiographie industrielle dans un contexte d'inspection numérique quantitative. Nous avons introduit les méthodes actuellement utilisées dans l'industrie. Il y a encore aujourd'hui des entreprises qui utilisent les films radiographiques ou les plaques au phosphores. Il est certain qu'avec ce genre de technologie il est plus difficile d'utiliser les algorithmes de vision numérique. Nous avons donc exposé des solutions qui pourraient aider l'industrie à faire son passage obligé vers le numérique et ainsi pouvoir profiter de la force ajoutée des algorithmes de vision numérique.

Il a d'abord été question d'un article qui a été publié dans le cadre du symposium de recherche de l'ASNT. Nous y avons discuté d'une nouvelle méthode d'inspection par rayons x pour l'utilisation sur des échantillons de pipelines. Il s'agit d'une méthode quantitative pour mesurer la profondeur de fissures dans ceux-ci. Cette méthode utilise des pièces de calibration en forme d'escalier pour obtenir des équivalences entre les épaisseurs et les valeurs de gris d'une image. Il a aussi été question d'une technique pour effectuer la correction de ces valeurs en fonction de la quantité de corrosion autour des fissures. Nous avons obtenus des résultats comparables à ceux obtenus avec la méthode par courants de Foucault. Bien que nous ne pouvons pas connaître l'impact de cet article sur l'industrie, nous y avons proposé un nouvel étalon pour les méthodes d'inspection utilisées en chantier. Nous croyons qu'avec plus de recherche sur ce sujet, ainsi qu'avec de meilleures données de comparaison, il serait possible d'arriver à des mesures plus exactes et automatisables.

Nous avons ensuite discuté du développement d'un algorithme de simulation d'images radiographiques qui pourrait être utilisé en combinaison avec la méthode détaillée dans l'article. Le but de cet algorithme était d'arriver à calculer les distances de parcours dans les pièces en inspection. Ces distances permettent de mieux connaître l'atténuation du faisceau aux différents endroits de la pièce. Nous avons commencé avec un algorithme qui se basait sur un espace de voxels pour déterminer ces valeurs. Celui-ci impliquait de découper la pièce en plusieurs voxels que nous travisions ensuite avec un rayon. Lors de la recherche pour trouver des moyens d'accélérer cette étape, nous sommes tombés sur un algorithme qui pourrait utiliser directement les triangles d'une pièce afin de calculer les entrées et sorties du rayon dans celle-ci. Nous avons rapidement choisis d'utiliser cet algorithme à la place de celui qui avait déjà été conçu vu ses

performances exceptionnelles.

Une fois cet algorithme bien implémenté dans un environnement utilisant la performance des cartes graphiques, nous avons travaillé sur un moyen d'utiliser la simulation pour obtenir des images de différences entre les images simulées et les images réelles. Il a donc été question du recalage de la pièce et de la calibration des valeurs de gris avec les épaisseurs simulées. Ceci nous a permis d'obtenir des images radiographiques robustes aux changements d'intensités causés par les différences d'épaisseur entre les différentes parties d'une pièce. Nous croyons que ces images sont la porte d'entrée vers l'utilisation de la vision numérique en radiographie industrielle traditionnelle. En effet, contrairement à un appareil de tomographie, l'équipement utilisé lors de cette recherche était simple et beaucoup moins coûteux. Il va sans dire que la simulation nous permet d'obtenir de l'information en trois dimensions qu'il serait difficile d'obtenir autrement. En connaissant les méthodes de vision numérique qui existent présentement, nous pensons que ce projet permettra de développer une solution d'inspection radiographique 3D rapide, précise et peu coûteuse. Remplacera-t-elle l'utilisation des appareils de tomographie aux endroits où la rapidité et le coût sont les enjeux principaux ? Seul l'avenir pourra le confirmer.

Bibliographie

- [1] F.H. ATTIX. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. John Wiley & Sons, 1986.
- [2] D. BARIK et M. MONDAL. « Object identification for computer vision using image segmentation ». In : *2nd International Conference on Education Technology and Computer* 2 (2010), p. 170-172.
- [3] BEEVIL. *Light spreading in the scintillator material leads to loss of resolution in indirect detectors which direct detectors do not experience*. [En ligne, accédée le 28 février 2020]. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Flat-panel_detector#/media/File:Resolution_in_direct_and_indirect_x-ray_detectors.svg.
- [4] BEEVIL. *The phosphor plate radiography process*. [En ligne, accédée le 6 mars 2020]. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/File:Computed_Radiography_Process.svg.
- [5] Yohan BELANGER, Luc PERRON et Xavier P.V. MALDAGUE. « High resolution SCC depth map in pipeline samples using new x-ray imaging techniques ». In : *ASNT Research symposium* (avr. 2019).
- [6] Jerrold T. BUSHBERG et al. *The essential physics of medical imaging*. 3^e éd. Philadelphia, PA : Lippincott Williams & Wilkins, 2012.
- [7] Paolo CIGNONI et al. « MeshLab : an Open-Source Mesh Processing Tool ». In : *Eurographics Italian Chapter Conference*. Sous la dir. de Vittorio SCARANO, Rosario De CHIARA et Ugo ERRA. The Eurographics Association, 2008. ISBN : 978-3-905673-68-5. DOI : [10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136](https://doi.org/10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136).
- [8] Elena FIORESE et al. « New Classification of Defects and Imperfections for Aluminum Alloy Castings ». In : *International Journal of Metalcasting* 9 (2015), p. 55-66.
- [9] Lars FRIEDRICH. *PolyData To ImageData*. [En ligne, accédée le 15 mars 2020]. URL : <https://lorensen.github.io/VTKExamples/site/Cxx/PolyData/PolyDataToImageData/>.
- [10] Geogebra GROUP. *Geogebra Math Apps*. [En ligne, accédée le 2 avril 2020]. URL : <https://www.geogebra.org/>.
- [11] Eugene HECHT. *Optics*. Fourth. San Francisco, CA : Addison Wesley, 2002.

- [12] J.H. HUBBELL et S.M. SELTZER. *NIST Standard Reference Number 126. X-Ray Mass Attenuation Coefficients*. Gaithersburg, MD, 5632 : National Institute of Standards et Technology. DOI : <https://dx.doi.org/10.18434/T4D01F>.
- [13] J.H. HUBBELL et S.M. SELTZER. « X-Ray Mass Attenuation Coefficients. NIST Standard Reference Database 126 ». In : (juil. 2004).
- [14] R. HUSSAIN et S. ZEADALLY. « Autonomous Cars : Research Results, Issues, and Future Challenges ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21 (sept. 2019), p. 1275-1313.
- [15] Driss El KHOUKHI et al. « Experimental investigation of the size effect in high cycle fatigue : Role of the defect population in cast aluminium alloys ». In : *International Journal of Fatigue* 129 (2019), p. 105-222.
- [16] KITWARE. *Visualization toolkit, VTK*. [En ligne, accédée le 15 mars 2020]. URL : <https://vtk.org/>.
- [17] Tomas MÖLLER et Ben TRUMBORE. « Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection ». In : *Journal of Graphics Tools* 2.1 (1997), p. 21-28.
- [18] NVIDIA. *Cuda C++ Programming Guide*. [En ligne, accédée le 8 mars 2020]. URL : <https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/index.html>.
- [19] Pierre OSMOND et al. « Effect of porosity on the fatigue strength of cast aluminium alloys : from the specimen to the structure ». In : *Procedia Engineering* 213 (2018), p. 630-643.
- [20] R. L. SIDDON. « Fast calculation of the exact radiological path for a three-dimensional CT array ». In : *Medical Physics* 12 (mar. 1985), p. 252-255.
- [21] Erik SUNDERMANN et al. « A Fast Algorithm to Calculate the Exact Radiological Path Through a Pixel Or Voxel Space ». In : *Journal of Computing and Information Technology* (déc. 1998).
- [22] Roger Booto TOKIME, Xavier MALDAGUE et Luc PERRON. « Automatic Defect Detection for X-Ray inspection : A U-Net approach for defect segmentation ». In : *Conference Paper : Digital Imaging and Ultrasonics for NDT* (juil. 2019).
- [23] M.J. WESTOBY et al. « 'Structure-from-motion' photogrammetry : A low-cost, effective tool for geoscience applications ». In : *Geomorphology* 179 (déc. 2012), p. 300-314.
- [24] Dan XU et al. « Detecting anomalous events in videos by learning deep representations of appearance and motion ». In : *Computer Vision and Image Understanding* 156 (mar. 2017), p. 117-127.
- [25] O. ZAHRAN et al. « Automatic weld defect identification from radiographic images ». In : *NDT&E International* 57 (mar. 2013), p. 26-35.