

Investigation des performances in situ de la numérisation
d'une tuyauterie industrielle par photogrammétrie et lumière
structurée

par

Valentin THIEULIN

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION
AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 18 JUIN 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Valentin Thieulin, 2019



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Rivest, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Souheil-Antoine Tahan, codirecteur
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Michel Rioux, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Carlos Vasquez, membre du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Marc Lépine, examinateur externe
CRÉAFORM®

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 14 JUIN 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais prendre le temps de remercier toutes les personnes ayant participé, de près ou de loin, à la concrétisation de ce mémoire de maîtrise.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mes directeur et co-directeur de recherche M. Louis Rivest et M. Antoine Tahan. Je les remercie avant tout pour la confiance qu'ils m'ont accordée, du temps qu'ils ont pris pour m'aider et pour mieux comprendre ce qu'est la recherche. Je témoigne ma grande reconnaissance pour leurs conseils constructifs, encouragements, suggestions, et les corrections qu'ils m'ont procurées pour mener à terme ce travail.

Je tiens à remercier Messieurs Michel Rioux et Carlos Vasquez, professeurs à l'École de technologie supérieure, et Monsieur Marc Lépine, ingénieur projet chez Créaform®, qui me font l'honneur d'examiner mon travail.

Je remercie Monsieur Joël Grignon de l'École de technologie supérieure pour le temps qu'il a consacré pour m'aider et pour répondre à toutes mes questions.

Je tiens à remercier Monsieur Kévin Benoit de l'entreprise TUYO® sans qui tout ce projet n'aurait pas existé, et pour le temps qu'il a pris pour répondre à mes questions sur les tuyauteries industrielles.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon frère, Thomas Thieulin, qui même depuis la Chine, qui malgré son travail à temps plein d'entrepreneur et de jeune papa, a pris le temps de lire ce mémoire plusieurs fois afin de m'aider.

Merci aux lecteurs d'avoir pris le temps de lire ce mémoire. Toutes erreurs qui pourraient se retrouver dans ce travail restent mon entière responsabilité.

Investigation des performances in situ de la numérisation d'une tuyauterie industrielle par photogrammétrie et lumière structurée

Valentin THIEULIN

RÉSUMÉ

L'installation de tuyauterie industrielle est une activité courante dans les chantiers de construction ou lors des opérations de réfection d'installations existantes. Actuellement dans cette industrie, les prises de mesures préalables à l'installation ou la modification d'une tuyauterie industrielle sont effectuées manuellement par un opérateur. Ces prises de mesures manuelles sont chronophages et peuvent être source d'erreurs. De plus, les outils conventionnels qui sont utilisés (ruban à mesurer, craies, pieds à coulisse, fil à plomb, etc.) ne sont pas adaptés pour un relevé dimensionnel précis. En outre, les conditions ne sont que rarement optimales, la luminosité est variable, les usines sont encombrées et la hauteur sous plafond peut être importante. Tous ces facteurs peuvent se conjuguer et amener à une carence de productivité.

Avec le développement technologique des instruments de mesure optique (sans contact), il est envisageable de remplacer ce processus manuel par un processus de numérisation tridimensionnelle. Il serait alors possible d'exploiter ce relevé numérique pour extraire les dimensions et les caractéristiques d'intérêt pour les opérations. Cependant, la réflectivité relativement élevée des tuyaux utilisés généralement dans les tuyauteries industrielles (par exemple : acier inoxydable, cuivre, aluminium, etc.) ou les conditions ambiantes peuvent poser un problème à certains systèmes de captation 3D.

Pour pallier ces problèmes, une idée a été avancée pour combiner plusieurs systèmes et techniques de numérisation 3D dans le but de pouvoir bénéficier des avantages de chacun, tout en réduisant les lacunes respectives. Dans le cadre du présent projet, on proposera la combinaison d'un système de photogrammétrie avec un scanneur 3D à lumière structurée.

La photogrammétrie permet une captation globale de l'intérieur de l'usine. On obtient donc un relevé de tous les objets dans la pièce qu'il faut prendre en compte pour la future tuyauterie que l'on souhaite mettre en place. Pour cette étape, une grande précision n'est pas forcément nécessaire puisque l'on souhaite avoir une idée de l'encombrement pour éviter une collision dans le chemin de la future tuyauterie, les détails les plus fins ne sont donc pas indispensables.

La numérisation 3D grâce à un scanneur 3D à lumière structurée quant à elle sert dans les endroits où l'on a besoin d'une plus grande précision pour pouvoir effectuer un travail de rétro-ingénierie. On l'utilise sur les zones où l'on va travailler dans l'immédiat. On utilise ensuite un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) pour effectuer un traitement de rétro-ingénierie sur ce nuage de points. Sur le maillage ainsi obtenu, on reconnaît les formes simples telles que les cylindres et les plans pour ensuite travailler avec un module du logiciel spécialisé pour la conception de tuyauterie industrielle.

VIII

Enfin, on superpose le nuage de points obtenu par photogrammétrie et le maillage obtenu grâce au scanneur 3D à lumière structurée. Cette superposition peut s'effectuer à l'aide de repères communs aux deux numérisations 3D. Dès lors, on peut concevoir une nouvelle tuyauterie ou modifier l'existante, éditer des plans industriels des tuyaux avec les cotes indiquées pour ensuite les découper de façon précise pour pouvoir les installer rapidement sur place dans l'usine. Combiner les systèmes permet donc de numériser un grand volume, tout en réussissant à numériser des surfaces réfléchissantes, et cela pour un coût moindre qu'un système de numérisation gros volume.

Mots clés : Photogrammétrie, scanneur 3D à lumière structurée, tuyauterie industrielle, rétro-ingénierie, numérisation 3D, nuage de points

Investigation of in situ performance of 3D scanning for industrial piping using photogrammetry and structured light

Valentin THIEULIN

ABSTRACT

It is common practice to install industrial piping on construction sites or when updating or upgrading existing facilities. Currently, an operator takes manual measurements prior to the installation or modification of industrial piping. Manual measurements are time-consuming, however, and can entail errors. Moreover, the conventional tools that are used (measuring tape, chalk, calipers, lead wire, etc.) are not suitable for accurate dimensional measurement, and conditions are rarely optimal — brightness is variable, factories are congested, and ceiling height can be an issue. When combined, these factors can result in a lack of productivity.

With the technological development of optical (contactless) measuring instruments, it is conceivable to replace this manual process with a three-dimensional scanning process. It would then be possible to use this digital measurement process to extract the dimensions and characteristics of interest for the operations in question. However, the relatively high reflectivity of the pipes commonly used for industrial piping (stainless steel, copper, aluminum, etc.) and ambient conditions can be problematic for some 3D capture systems.

It has been suggested to overcome these problems by combining several 3D scanning techniques and systems to benefit from the advantages of each while reducing their respective deficiencies. This project proposes to combine a photogrammetry system and a structured-light 3D scanner.

Photogrammetry provides a general overview of the inside of a factory, allowing one to see the bulk of the objects in the room that must be taken into account for the piping that is to be installed. For this step, great precision is not strictly necessary, as one simply wants to have an overall idea of the clutter, to avoid a collision when laying the path of future piping; hence, minute details are not essential.

Preference is given to 3D scanning using a structured-light 3D scanner where more precision is needed to perform reverse engineering. It is used on areas where work is to take place immediately. Computer-aided design (CAD) software is then used to perform reverse engineering on the points cloud. One can then recognize simple forms, such as cylinders, from the mesh obtained, and subsequently work with a specialized software module to design the industrial piping.

Finally, the points cloud obtained by photogrammetry and the mesh obtained by structured-light 3D scanning are superimposed. This superimposition can be done using markers common to both 3D scans. From there, one can design new piping or modify the existing piping, editing the industrial piping plans with the dimensions indicated. Then, the piping can be accurately cut for quick on-site installation. Combining the systems makes it possible to successfully scan a large volume and reflective surfaces, at a lower cost than a high-volume scanning system.

Keywords: Photogrammetry, Structured-light 3D scanner, Industrial piping, Reverse engineering, 3D scan, Points cloud

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	23
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	27
1.1 Introduction.....	27
1.2 Les différents types de systèmes de mesure	28
1.2.1 Les systèmes de mesure	28
1.2.1.1 Utilisation des données dans les systèmes à distribution.....	29
1.2.1.2 Les systèmes sans contact.....	30
1.2.1.3 Les systèmes par palpé.....	31
1.2.2 Multilatération.....	33
1.2.3 Laser Tracker	33
1.2.4 Laser Radar / Lidar	36
1.2.5 Scanneur Laser.....	38
1.2.6 Scanneur 3D à lumière structurée	40
1.2.7 Laser Tracer	41
1.2.8 iGPS	42
1.2.9 Photogrammétrie.....	43
1.2.10 Combiner les systèmes.....	45
1.3 Critères pour la sélection des technologies	47
1.3.1 Précision des systèmes de mesures	49
1.3.2 Taille des pièces et volume	50
1.3.3 Ergonomie et prix	52
1.3.4 Les influences sur les systèmes de mesure causant des incertitudes de mesures	53
1.3.5 Topologie : centralisé / à distribution	56
1.4 Inventaire d'appareils de métrologie à grande échelle	57
1.4.1 Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).....	57
1.4.2 Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) portable.....	58
1.4.3 Laser Tracker	60
1.4.4 Lidar	61
1.4.5 Laser Tracer	63
1.4.6 Scanneur Laser.....	64
1.4.7 Scanneur 3D à lumière structurée	66
1.4.8 iGPS	67
1.4.9 Photogrammétrie.....	68
1.4.10 Comparatif global des différents systèmes de mesures	69
1.5 Conclusion	70
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET MATÉRIELS.....	71
2.1 Cahier des charges	73

2.2	Matériels	74
2.2.1	Scanneur 3D à lumière structurée	74
2.2.2	Photogrammétrie	75
2.3	Expérimentations en laboratoire de métrologie	77
2.3.1	Choix du logiciel de vérification.....	78
2.3.2	Confirmation de la précision du matériel.....	80
2.4	Expérimentations en conditions réelles	80
2.4.1	Numérisation grâce à un scanneur 3D à lumière structurée	81
2.4.2	Numérisation grâce à la photogrammétrie	83
2.5	Traitement des données relevées	84
2.5.1	Transformation du nuage de points en maillage	85
2.5.2	Exploitation du maillage	90
2.5.3	Routage	93
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET ANALYSE.....		97
3.1	Résultats en laboratoire de métrologie.....	97
3.1.1	Valeurs de référence	97
3.1.2	Comparaison des logiciels	98
3.1.3	Précision.....	99
3.1.3.1	L'influence de la lumière sur la précision des mesures	100
3.1.3.2	L'influence du nombre de pixels pour la photogrammétrie.....	102
3.2	Résultats de l'expérimentation in situ.....	105
3.2.1	Go!Scan 50.....	105
3.2.2	Photogrammétrie.....	107
3.3	Évaluation temporelle	115
3.4	Résultats <i>SolidWorks</i> ©	118
CHAPITRE 4 SOLUTION PROPOSÉE		123
4.1	Superposition des données des deux systèmes	123
4.2	Exemple de réalisations possibles.....	126
4.3	Estimation du coût de la solution.....	130
CONCLUSION.....		135
RECOMMANDATIONS		137
ANNEXE I DONNÉES DES ESSAIS DANS LE LABORATOIRE MÉTROLOGIQUE ..		139
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		145
BIBLIOGRAPHIE		147

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Ordre de grandeur des précisions des systèmes de mesures49
Tableau 1.2	Ordre de grandeur des tailles de pièce numérisable.....50
Tableau 1.3	Évaluation de l'ergonomie et du prix Tiré de (Franceschini et al., 2014)52
Tableau 1.4	Topologies des systèmes Construit à partir de (Schmitt et al., 2016).....56
Tableau 1.5	Caractéristiques MMT grande échelle58
Tableau 1.6	Caractéristiques MMT Portable.....59
Tableau 1.7	Comparatif Laser Trackers61
Tableau 1.8	Caractéristiques Lidar62
Tableau 1.9	Caractéristiques Laser Tracer63
Tableau 1.10	Comparaison des scanners laser Creaform®65
Tableau 1.11	Comparaison des caractéristiques scanner à lumière structurée portable.....67
Tableau 1.12	Caractéristiques système de photogrammétrie.....68
Tableau 1.13	Comparatif global des systèmes de mesures.....69
Tableau 2.1	Cahier des charges73
Tableau 2.2	Liste des matériaux des tuyaux de l'échantillon.....77
Tableau 3.1	Définition des « diamètres de référence » [mm].....97
Tableau 3.2	Définition des « longueurs de référence » [mm]98
Tableau 3.3	Comparaison des logiciels de rétro-ingénierie.....99
Tableau 3.4	Influence de la lumière sur la numérisation des diamètres avec la méthode de lumière structurée (erreurs relatives)100
Tableau 3.5	Influence de la lumière sur la numérisation des longueurs avec la méthode de lumière structurée (erreurs relatives)100

Tableau 3.6	Résultats sur la précision de numérisation des diamètres obtenus par photogrammétrie	102
Tableau 3.7	Résultats sur la précision de numérisation des longueurs obtenues par photogrammétrie	102
Tableau 3.8	Tableau comparatif des précisions des deux systèmes	104
Tableau 3.9	Importance du nombre de photos et de la résolution pour la photogrammétrie	104
Tableau 3.10	Récapitulatif des erreurs absolues des systèmes [mm]	104
Tableau 4.1	Tableau comparatif des solutions.....	131

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Diagramme général du procédé de rétro-ingénierie.....27
Figure 1.2	Classification des systèmes de métrologie à grande échelle Tirée de (Schmitt et al., 2016)28
Figure 1.3	Schéma des deux approches Tirée de (Franceschini et al., 2016)29
Figure 1.4	Principe général des systèmes optiques Tirée de (InnovMetricLogiciels, 2010).....30
Figure 1.5	Principe du palpage Tirée de (InnovMetricLogiciels, 2010).....31
Figure 1.6	MMT pour grande pièce Tirée de (Schmitt et al., 2016)32
Figure 1.7	Schéma du fonctionnement d'un interféromètre Tirée de ("Diagramme schématique de l'interféromètre de Michelson," 2013).....34
Figure 1.8	Laser Tracker FARO ®35
Figure 1.9	Schéma du principe de fonctionnement d'un système Lidar Tirée de (Limahn, 2014)37
Figure 1.10	Exemple de tourelle Lidar Tirée de (Monniaux, 2007)37
Figure 1.11	Principe de fonctionnement d'un scanneur laser Tirée de (InnovMetricLogiciels, 2010).....38
Figure 1.12	Principe de fonctionnement des scanneur 3D à lumière structurée Tirée de (InnovMetricLogiciels, 2010).....40
Figure 1.13	Principe de fonctionnement et exemple d'un <i>Laser Tracer</i> Tirée de (Gaska et al., 2014)41
Figure 1.14	Schématisation du système iGPS Tirée de (Peggs et al., 2009).....42
Figure 1.15	Système iGPS Tirée de (NikonMetrology, 2016).....42
Figure 1.16	Appareil photo – Sigma SD1 Merrill 46 Mpix43
Figure 1.17	Exemple de reconstitution par photogrammétrie Tirée de (Valente, 2017)44

Figure 1.18	Combinaison de systèmes Tirée de (Metris3D, 2010).....	45
Figure 1.19	Évolution des principaux systèmes de métrologie à grande échelle au cours du temps et leur précision Tirée de (Franceschini, Galetto, Maisano, & Mastrogiacomo, 2016)	46
Figure 1.20	Exemple d'organisation de critères pour choisir un système (1/2) Tirée de (Franceschini et al., 2014)	47
Figure 1.21	Exemple d'organisation de critères pour choisir un système (2/2) Tirée de (Franceschini et al., 2014)	48
Figure 1.22	Ordre de grandeur des pièces numérisables pour chaque technique Tirée de (InnovMetricLogiciels, 2010).....	51
Figure 1.23	Exemple d'influences parasites sur le processus de mesure Tirée de (Schmitt et al., 2016)	53
Figure 1.24	Comparaison des sensibilités à la réflectivité selon la technologie Tirée de (InnovMetricLogiciels, 2010).....	54
Figure 1.25	Nuage de points relevé par un Lidar montrant l'influence de la réflectivité Tirée de (Fidera, Chapman, & Hong, 2004)	55
Figure 1.26	MMT grande échelle : Leitz PMM-G	57
Figure 1.27	HandyProbe© de Créaform®	58
Figure 1.28	Leica® Absolute Tracker AT960	60
Figure 1.29	Faro® Vantage.....	60
Figure 1.30	Lidar Artec Ray©	61
Figure 1.31	Can Drone M210 M8 Snoopy Lidar©	62
Figure 1.32	LaserTRACER-NG Etalon®	63
Figure 1.33	Gamme de scanneur laser Nikon Metrology®	64
Figure 1.34	Gamme de scanneurs laser Creaform ® HandyScan 3D© / MetraScan 3D© (avec MER)	65
Figure 1.35	Artec Eva©	66
Figure 1.36	Scanneur 3D à lumière structurée de Creaform ® : Go!Scan 50©.....	66
Figure 1.37	iGPS Nikon Metrology®	67

Figure 1.38	Système optique de mesure de coordonnées Creaform® : MaxSHOT 3D © (se combine avec d'autres systèmes de numérisation).....	68
Figure 2.1	Laboratoire de métrologie de l'ÉTS	71
Figure 2.2	Stationnement de l'ÉTS.....	72
Figure 2.3	Tuyauterie industrielle	72
Figure 2.4	Go!Scan 50© de Creaform®	74
Figure 2.5	Mallette du Go!Scan 50©	75
Figure 2.6	Appareil photo utilisé pour la photogrammétrie	75
Figure 2.7	Ensemble de tuyaux fournis par TUYO® appelé par la suite « échantillon ».....	77
Figure 2.8	Installation dans le laboratoire de métrologie	78
Figure 2.9	Comparaison des logiciels de rétro-ingénierie.....	79
Figure 2.10	Capture d'écran du logiciel <i>PolyWorks</i> ©	79
Figure 2.11	Capture d'écran du logiciel <i>VxModel</i> ©.....	79
Figure 2.12	Schéma explicatif des calculs de précision	80
Figure 2.13	Cibles normalisées aidant la numérisation.....	81
Figure 2.14	Installation dans le stationnement.....	82
Figure 2.15	Déviations de la numérisation créée par l'utilisation du mode "cibles naturelles"	82
Figure 2.16	Illustrations d'un nuage de points et d'un maillage triangulaire Tirée de (Creaform©, 2014)	85
Figure 2.17	Nuage de points importé	86
Figure 2.18	Assistant préparation du maillage.....	87
Figure 2.19	Nettoyage manuel du nuage de points	87
Figure 2.20	Suppression du bruit du nuage de points	88
Figure 2.21	Simplification: réduction du nombre de points.....	88

Figure 2.22	Option "remplir les trous" (avant).....	89
Figure 2.23	Option "remplir les trous" (après).....	89
Figure 2.24	Assistant surfacique	90
Figure 2.25	Extraction des surfaces	91
Figure 2.26	Surfaces extraites	91
Figure 2.27	Schéma du fonctionnement du module <i>ScanTo3D</i> Tirée de (SolidWorksHelp, 2012).....	92
Figure 2.28	Tuyaux normalisés constraints	93
Figure 2.29	Exemple de mise en plan d'une section de tuyaux.....	94
Figure 2.30	Organigramme résumant les étapes du projet.....	95
Figure 3.1	Rendu 3D obtenu par photogrammétrie montrant les valeurs aberrantes pour les diamètres	103
Figure 3.2	Nuage de points relevé par lumière structurée.....	105
Figure 3.3	Nuage de points relevé par lumière structurée (vue du dessous).....	106
Figure 3.4	Nuage de points relevé par photogrammétrie (vue latérale).....	107
Figure 3.5	Nuage de points relevé par photogrammétrie (vue du dessous)	108
Figure 3.6	Aperçu du rendu 3D sous <i>Autodesk Recap Photo</i> © (Stationnement 1/2).....	109
Figure 3.7	Aperçu du rendu 3D sous <i>Autodesk Recap Photo</i> © (Stationnement 2/2).....	110
Figure 3.8	Problème de numérisation : gros bloc de tuyaux	111
Figure 3.9	Problème de numérisation : gros bloc de tuyaux (rendu 3D sans texture).....	111
Figure 3.10	Aperçu du rendu 3D sous <i>Autodesk Recap Photo</i> © (deuxième stationnement).....	112
Figure 3.11	Aperçu du rendu 3D sans texture sous <i>Autodesk Recap Photo</i> © (deuxième stationnement).....	112
Figure 3.12	Zoom sur la tuyauterie (deuxième stationnement).....	113

Figure 3.13	Zoom sur la tuyauterie, rendu 3D sans texture (deuxième stationnement).....	113
Figure 3.14	Aperçu du rendu 3D, avec représentations des emplacements où les photographies ont été prises sous <i>Autodesk Recap Photo</i> © (deuxième stationnement).....	114
Figure 3.15	Temps de captation pour la lumière structurée et la photogrammétrie	115
Figure 3.16	Ratio temps / surface au plancher	116
Figure 3.17	Coefficient indicateur d'efficacité (échelle logarithmique).....	117
Figure 3.18	Reconnaissance de géométries simples (seulement à partir des données provenant de la lumière structurée).....	118
Figure 3.19	Conception assistée par ordinateur possible à partir du nuage de points (lumière structurée uniquement)	119
Figure 3.20	Mise en plan de l'assemblage réalisé à partir du nuage de points de la lumière structurée.....	120
Figure 3.21	Superposition du nuage de points de la photogrammétrie avec l'exemple de tuyauterie réalisé.....	121
Figure 4.1	Importation du nuage de points provenant de la photogrammétrie sur la conception de la tuyauterie.....	123
Figure 4.2	Translation manuelle selon les axes x, y et z	124
Figure 4.3	Rotation manuelle selon les axes x, y et z	124
Figure 4.4	Calage du nuage de points de la photogrammétrie sur un élément de référence.....	125
Figure 4.5	Création d'une tuyauterie s'insérant dans l'environnement, sans collision.....	126
Figure 4.6	Détection facile des collisions grâce à la superposition du nuage de points de la photogrammétrie et du maillage de la lumière structurée	127
Figure 4.7	Mise en plan globale permettant une bonne compréhension du projet....	128
Figure 4.8	Mise en plan spécifique d'une sous-section de la tuyauterie à réaliser	129

Figure 4.9	Comparaison des ordres de grandeur de portée et de précision des deux systèmes	130
Figure 4.10.	Fiche mémo du processus de numérisation et de traitement des données	132
Figure 4.11	Fiche mémo du processus de traitement des données photogrammétriques, « opération 1 »	133
Figure 4.12	Fiche mémo du processus de traitement des données de la lumière structurée, « opération 2 ».....	134

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADM	Absolute Distance Meter
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
IR	Infrarouge
LT	Laser Tracker
MER	Méthode Externe de Référencement
MGE	Métrologie à Grande Échelle
MMT	Machine à Mesurer Tridimensionnelle
SMR	Spherically-Mounted Reflector

INTRODUCTION

Actuellement, notre partenaire industriel, TUYO®, une entreprise canadienne de tuyauterie industrielle travaille principalement sur l'installation des tuyauteries selon les besoins du client dans les usines. Préalablement à l'installation, des prises de mesures sont nécessaires. Ces mesures sont pour l'instant effectuées manuellement par un opérateur. Cette action est très chronophage et l'opérateur est une source d'erreur inévitable. De plus, la précision obtenue n'est pas satisfaisante. Les erreurs sont de l'ordre de plusieurs millimètres pour une tuyauterie complète, voire proche du centimètre. Ce manque de précision oblige les opérateurs à redécouper certains tuyaux sur place. Cela entraîne donc des arrêts d'usine prolongés et onéreux lors de l'installation des tuyaux.

Le développement des technologies de métrologie à grande échelle¹ (MGE), de la numérisation tridimensionnelle permettant d'effectuer ces relevés de façon numérique et permettant ensuite de préparer le matériel hors site, offre de nouvelles opportunités. Cela permettrait d'éviter les problèmes engendrés par des prises de mesures manuelles réalisées à l'aide d'outils conventionnels (ruban à mesurer, craies et pied à coulisse). L'essor de ces technologies a donc amené TUYO® à envisager une intégration numérique pour remplacer sa méthode actuelle.

Ces systèmes de numérisation 3D à grand volume sont de plus en plus performants et précis, mais cela s'accompagne aussi d'un coût assez élevé. De plus, les surfaces réfléchives ciblées peuvent poser des problèmes pour être captées par des systèmes de mesures optiques. Or, les tuyauteries industrielles sur lesquelles TUYO® intervient sont en partie composées d'acier inoxydable en milieu alimentaire, où la surface est propre et réfléchive. Dans ce travail, nous allons nous pencher sur les solutions envisageables et envisagées pour numériser fidèlement les surfaces réfléchives comme l'acier inoxydable, le cuivre ou encore l'aluminium.

¹ Science de la mesure appliquée à une grande échelle : d'un mètre à plusieurs centaines de mètres (Schmitt et al., 2016)

Une combinaison de technologies et de systèmes peut être envisagée, permettant ainsi de diminuer grandement les coûts tout en profitant des avantages de chacun et en palliant leurs défauts respectifs.

Dans le cadre de ce projet de recherche, on se limitera à des solutions dont le coût est inférieur à 50 000\$CAD, mais d'autres solutions seront tout de même proposées pour ne pas exclure des systèmes qui pourraient répondre partiellement aux critères du cahier des charges.

L'objectif général de ce projet est de proposer une chaîne d'outils et de traitements numériques pour supporter les travaux de modification d'une installation de tuyauterie industrielle du domaine alimentaire ou pharmaceutique. On découpera cet objectif général en deux objectifs spécifiques. Ces objectifs seront d'évaluer et comparer les alternatives technologiques pour numériser des installations de tuyauterie industrielle et de proposer les grandes composantes d'une chaîne numérique dédiée à la conception d'une tuyauterie industrielle.

Pour cela, on proposera la méthodologie suivante. On fera d'abord l'inventaire des technologies de numérisation applicables à la tuyauterie industrielle. Puis, on caractérisera et comparera ces technologies afin d'en dégager les plus appropriées : On testera les performances métrologiques de ces solutions. Enfin, on explorera la capacité d'intégration de ces technologies au sein d'une chaîne numérique de conception de tuyauterie.

Tout d'abord le Chapitre 1 « REVUE DE LITTÉRATURE » introduit les notions de numérisation 3D et les concepts de fonctionnement. Ensuite, les critères de choix à considérer seront abordés. Enfin, un inventaire des technologies actuelles de numérisation 3D sera effectué et des exemples de systèmes seront donnés. Le Chapitre 2 « MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET MATÉRIELS » présente le matériel utilisé et la façon dont le choix et la vérification des systèmes ont été faits. Il présente ensuite la procédure suivie in situ pour tester les systèmes. Il établit les paramètres à prendre en compte. Le Chapitre 3 « RÉSULTATS ET ANALYSE » présente les résultats obtenus lors des diverses expérimentations, résultats que l'on analysera. Le Chapitre 4 « SOLUTION PROPOSÉE » présente la solution que l'on

proposera pour répondre au cahier des charges le plus efficacement. Elle sera expliquée et illustrée. Finalement, la conclusion établit les points essentiels de cette étude ainsi que d'autres recommandations pour des travaux futurs.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Afin de pouvoir proposer des pistes de solution performantes capables de numériser des tuyauteries industrielles à forte réflectivité, il faut d'abord comprendre les principes de fonctionnement des appareils de numérisation tridimensionnelle. Ensuite, il convient d'exposer les différentes technologies disponibles. Enfin des exemples d'appareils avec leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs inconvénients seront abordés. Ainsi, on pourra identifier certaines pistes de solutions en jugeant de leur capacité à surmonter le problème que pose la réflectivité. Pour cela, la littérature concernant la métrologie 3D et plus particulièrement la métrologie 3D à grande échelle sera explorée.

Cette étude de la littérature permettra d'identifier des pistes de solutions permettant de pouvoir accomplir la première étape du procédé de rétro-ingénierie (*voir* Figure 1.1) sur lequel repose les intentions de notre projet.

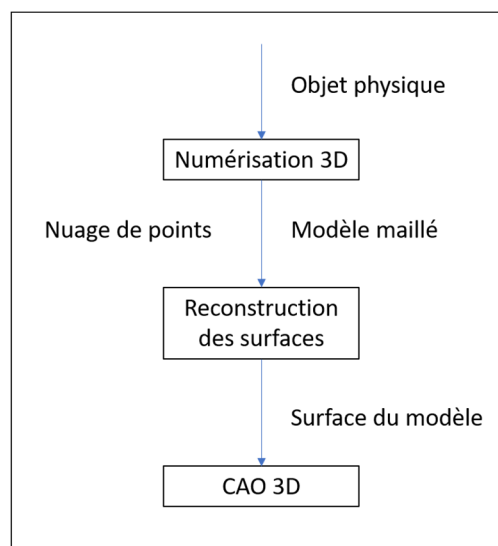


Figure 1.1 Diagramme général du procédé de rétro-ingénierie

1.2 Les différents types de systèmes de mesure

1.2.1 Les systèmes de mesure

En métrologie 3D, les systèmes de mesure peuvent être classés selon plusieurs critères. Tout d'abord, on distingue les **systèmes sans contact** (ex : la numérisation 3D peut être optique) et les **systèmes avec contact**, par palpage (InnovMetricLogiciels, 2010). Ou bien, on peut aussi classer les systèmes de mesure par leur manière de mesurer les coordonnées des points. Sur la Figure 1.2, on distinguera les systèmes dits « **centralisés** », qui ne nécessitent qu'un seul appareil indépendant pouvant calculer les coordonnées du point souhaité, même si des accessoires auxiliaires peuvent intervenir tels que des cibles réfléchissantes (*spherically-mounted reflector* (SMR)) pour le *laser-tracker* (LT); et les systèmes « **à distribution** », qui nécessitent plusieurs unités rassemblant leurs informations pour pouvoir calculer les coordonnées du point souhaité. Un exemple qui sera traité d'un tel système est le Nikon iGPS (GPS intérieur), mais il est aussi possible de combiner plusieurs systèmes centralisés pour les utiliser en un système à distribution.

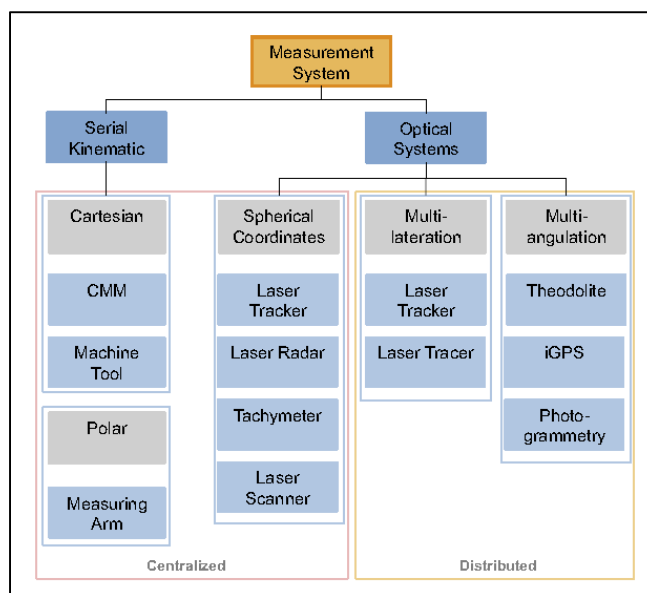


Figure 1.2 Classification des systèmes de métrologie à grande échelle
Tirée de ([Schmitt et al., 2016](#))

1.2.1.1 Utilisation des données dans les systèmes à distribution

Lorsque le système est à **distribution**, une question se pose : comment les données sont-elles utilisées pour déterminer les coordonnées du point souhaité ? Deux approches sont possibles (voir la Figure 1.3) :

1. La **fusion compétitive** ([Franceschini, Galetto, Maisano, & Mastrogiacomio, 2016](#)) est l'approche la plus répandue pour la métrologie à grande échelle (MGE) et utilisée avec le logiciel *SpatialAnalyser*®. L'objectif de cette approche est d'améliorer la précision des mesures tout en réduisant le risque d'erreur de mesure. Pour son fonctionnement, chaque système mesure les coordonnées du point d'intérêt et les différentes coordonnées sont mises en compétition pour déterminer celles retenues par le système, d'où l'expression « compétitive ».
2. La **fusion coopérative** ([Franceschini et al., 2016](#)) consiste à utiliser les données d'au moins deux capteurs indépendants (pas forcément homogènes, c'est-à-dire que l'on peut combiner des capteurs d'angles et de distances) pour obtenir les coordonnées du point d'intérêt, là où les capteurs d'un système seul n'auraient pas pu les déterminer. Les différents capteurs « coopèrent » afin d'obtenir les coordonnées uniques du point. Par exemple, on peut avoir la situation où l'on utilise deux (2) capteurs d'un système mesurant des angles, et un (1) capteur d'un autre système mesurant des distances, ces deux ensembles de capteurs vont « coopérer » pour déterminer les coordonnées 3D du point d'intérêt.

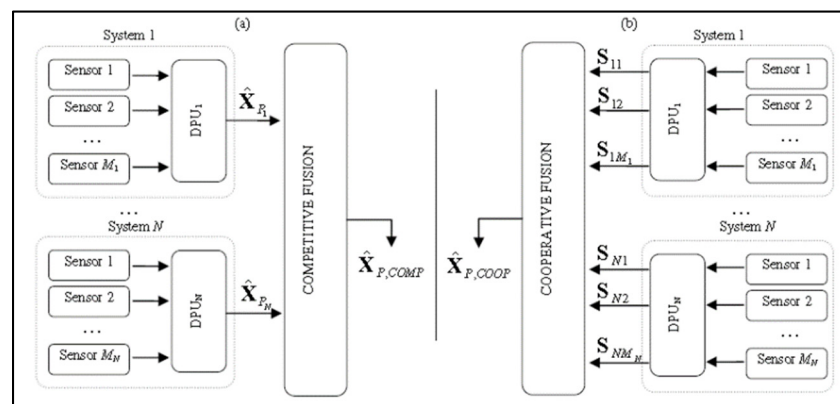


Figure 1.3 Schéma des deux approches
Tirée de ([Franceschini et al., 2016](#))

Cependant, il n'y a pas d'augmentation de performance significative en choisissant l'approche coopérative, moins utilisée ([Franceschini et al., 2016](#)). Le choix entre ces deux approches dépendra donc du cas et des technologies utilisées.

1.2.1.2 Les systèmes sans contact

L'objectif des systèmes sans contact (souvent optiques) est de numériser un grand nombre de points 3D sur la surface d'objets sans avoir à cibler les points spécifiques et sans requérir le contact avec l'objet. En effet, on ne peut pas toujours atteindre l'objet ciblé. Bien souvent, les méthodes optiques reposent sur le modèle suivant (*voir* Figure 1.4) :

1. Projection d'énergie sur l'objet ciblé (différents types de lumière sont utilisés : lumière blanche visible, laser, lumière infrarouge (IR) invisible, rayons X);
2. Réception de l'énergie réfléchie par un capteur (généralement une caméra);
3. Calcul des coordonnées des points (x,y,z) mesurées.

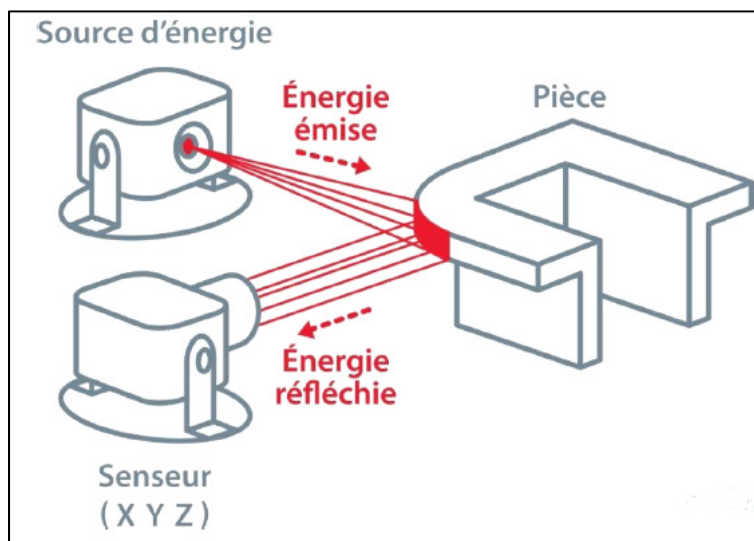


Figure 1.4 Principe général des systèmes optiques
Tirée de ([InnovMetricLogiciels, 2010](#))

Parmi les systèmes optiques, on trouve différentes catégories ([InnovMetricLogiciels, 2010](#)) :

- Les **capteurs 3D volumétriques** de type destructif mesurent la géométrie interne d'un objet en enlevant une mince couche de matériel, numérisant ce qui est visible, et recommençant ainsi de suite l'opération, jusqu'à ce que l'objet soit entièrement numérisé et détruit.
- Les **capteurs 3D volumétriques** de type non-destructif, utilisant les rayons X (tomographie industrielle) ou la résonance magnétique (IRM) par exemple, reposent sur le même principe que pour numériser l'intérieur d'un corps humain, mais pour des objets industriels. En revanche, les puissances des sources d'énergie sont en général beaucoup plus importantes dans ces cas-ci.
- Les **capteurs 3D de surfaces** non-destructifs utilisent la lumière blanche visible, la lumière IR invisible ou encore la lumière d'un laser. Ils ne peuvent numériser que ce qu'ils « voient ».

1.2.1.3 Les systèmes par palpation

Pour les systèmes par palpation, les points d'intérêts peuvent être mesurés par des principes mécaniques par palpeur sphérique dont l'extrémité entre en contact avec la surface de l'objet. On obtient alors le centre de la sphère pour ensuite remonter au point de la surface, cette étape de calcul s'appelle la « compensation » (*voir* Figure 1.5).

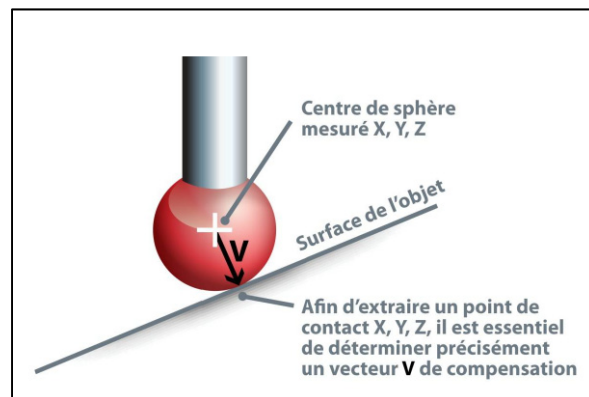


Figure 1.5 Principe du palpation
Tirée de ([InnovMetricLogiciels, 2010](#))

Le plus souvent, les machines employées sont les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) traditionnelles. Elles ont des incertitudes relativement faibles, mais ne sont pas portables. Cela rend leur utilisation impossible dans le cas de la MGE (*voir* Figure 1.6). Elles ne pourront pas être utilisées pour notre projet.

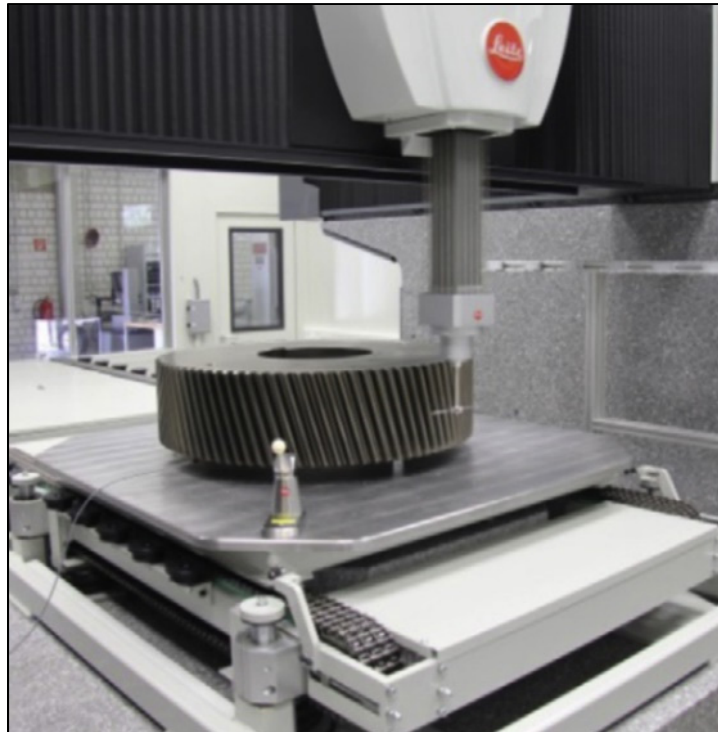


Figure 1.6 MMT pour grande pièce
Tirée de (Schmitt et al., 2016)

Néanmoins, des MMT portables existent aussi. Elles sont généralement moins chères que les MMT traditionnelles, mais doivent être manipulées manuellement (manœuvrées par une personne) et sont légèrement moins précises (ex : bras de mesure FARO®, HandyProbe®, ROMER Absolute Arm®, ...).

1.2.2 Multilatération

La multilatération est une méthode de surveillance basée sur la mesure de la différence de distance entre deux stations dont on connaît les positions grâce à la diffusion de signaux à des moments connus. Par exemple, les systèmes GPS peuvent utiliser ce système pour la localisation (possible avec 3 satellites mais 4 satellites sont nécessaires pour plus de précision). En métrologie, c'est un principe utilisé par les *Laser Tracker* (LT).

Chaque unité va émettre un signal qui va se réfléchir sur la cible SMR en déplacement, lors du retour du signal réfléchi (dont on connaît la vitesse en plus de connaître le moment précis d'émission et de réception), on peut créer une sphère de position possible autour du LT, en recoupant avec les sphères des autres unités de LT, on peut ainsi déterminer la position précise de la cible SMR et ainsi la suivre.

1.2.3 Laser Tracker

Pour fonctionner, le *laser tracker* (LT) mesure deux angles et une distance. Pour mesurer les angles, des codeurs angulaires sont présents sur la machine. Pour mesurer la distance, un faisceau laser est envoyé vers une cible rétro réfléchissante (qui peut être une SMR) disposée sur l'objet à mesurer. La lumière est donc réfléchi par la cible, elle effectue alors le chemin inverse pour enfin retourner à son point de départ atteignant des capteurs. Le dispositif calculant la distance peut soit être un interféromètre, soit un appareil de mesure de la distance absolue (*Absolute Distance Meter* (ADM)). Pour être mis en œuvre, ce dernier consiste à moduler le faisceau infrarouge émis par le laser et à mesurer le décalage de phase entre le faisceau incident et le faisceau réfléchi par la bille SMR. Ce décalage de phase permet d'obtenir la distance. Le fonctionnement d'un interféromètre est illustré dans la Figure 1.7.

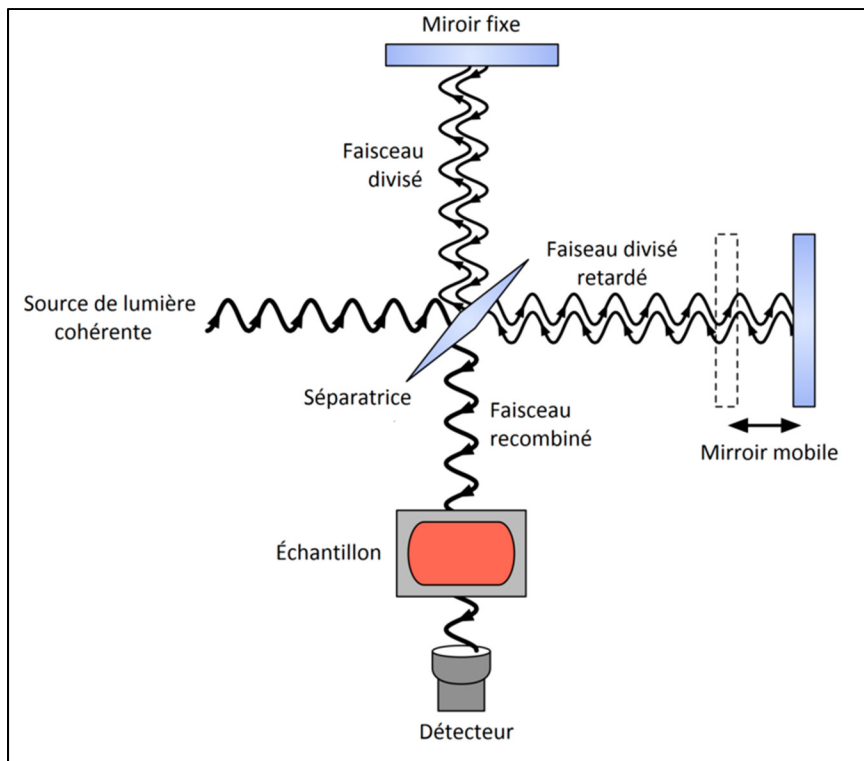


Figure 1.7 Schéma du fonctionnement d'un interféromètre
Tirée de ("Diagramme schématique de l'interféromètre de
Michelson," 2013)

Sur le plan pratique, l'utilisation de l'ADM a des avantages : si le faisceau est coupé, l'appareil se recalcule automatiquement dès qu'il retrouve le faisceau. Contrairement aux mesures de distance faites avec un interféromètre, il n'y a pas de zéro à refaire (pour faire ce zéro, l'opérateur doit amener la cible SMR sur la face du *laser tracker*), l'opérateur n'a pas à se déplacer et le gain de temps est donc conséquent (Faro®, 2015).

Pour ce qui est de la précision que l'on peut espérer d'un LT, cela dépend de sa position. En effet, si l'objet est dans l'axe du LT, les codeurs angulaires sont très peu sollicités, ils n'apporteront que peu d'incertitude dans la mesure. Or, les codeurs pèsent de façon importante dans l'incertitude globale (Faro®, 2015). Dans des conditions optimales, avec l'objet dans l'axe du LT, on a généralement une incertitude typique de 11 μm à 10 m de distance. Si les codeurs angulaires sont sollicités, l'incertitude est un peu plus grande, d'environ 50 μm . L'ordre de grandeur de la distance maximale pour un LT est de 160 m, mais on peut le déplacer.

Le nombre de points mesurés par le LT est de 16 000 par seconde (pour le *Laser Tracker* de FARO®, voir Figure 1.8). Les quantités de données à traiter peuvent donc vite devenir importantes. Plusieurs LT peuvent être utilisés en même temps pour couvrir pleinement et sous tous les angles un grand volume.



Figure 1.8 Laser Tracker FARO ®

Le LT peut aussi se combiner à un autre appareil mobile de mesure permettant de résoudre l'aspect limité du champ de vision du LT. En effet, l'appareil mobile est repéré par le LT, qui peut donc le situer dans l'espace, il va ensuite pouvoir numériser l'objet cible grâce à une autre technologie (scanneur laser, palpeur, ...). On peut citer par exemple le Leica T-probe©, API IntelliProbes© ou encore le TrackArm© de FARO®.

1.2.4 Laser Radar / Lidar

Le principe de fonctionnement du Lidar ressemble à celui du radar classique (basé sur l'écholocation), la différence étant le domaine spectral des ondes électromagnétiques employées (micro-ondes pour le radar, et infrarouge, domaine du visible ou ultraviolet proche pour le laser du Lidar). Le point commun entre les deux méthodes est que l'onde électromagnétique émise est cohérente² et polarisée, mais beaucoup plus directive³ pour le Lidar. Ces derniers ont de nombreuses applications, voici quelques exemples :

- La reconstitution 3D (architecture, urbanisme, archéologie, ...) ;
- Télémétrie en temps réels (en développement dans les véhicules autonomes) ;
- Contrôle de vitesse (sécurité routière) ;
- Topographie (terrestre ou autre, exemple : Mars grâce au Lidar MOLA de la sonde MGS), les Lidar peuvent donc être aéroportés.

Les Lidars reposent donc sur la vitesse de la lumière dans le milieu pour calculer les distances (voir Figure 1.9). On parle donc du temps de vol (*time of flight* en anglais (TOF)). Cela permet aux Lidars d'être très rapides pour fournir des données.

² Ondes cohérentes si elles ont la même fréquence et si le déphasage est constant

³ Onde directive : concentre l'énergie qu'elle rayonne dans une direction de l'espace

Pour la reconstitution 3D, on utilise généralement des lidars télémètres laser à balayage (« lidars à cible dure »). Les stations Lidar sont constituées d'un trépied permettant d'être stable pendant les mesures (voir Figure 1.10). Le Lidar balaye son environnement avec un faisceau laser et mesure pour chaque point balayé sa distance au Lidar, permettant grâce au balayage complet de la zone ciblée de reconstruire un modèle tridimensionnel de la scène.

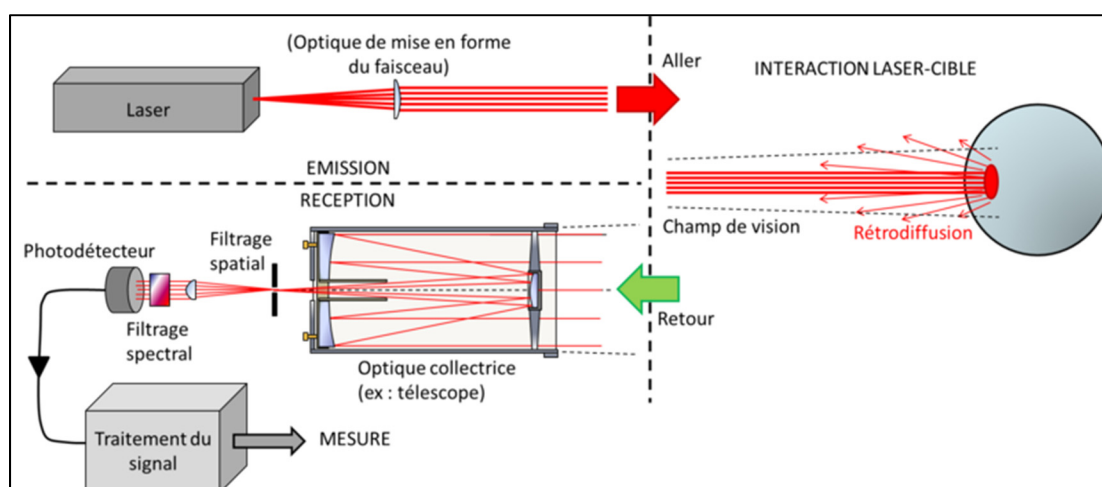


Figure 1.9 Schéma du principe de fonctionnement d'un système Lidar
Tirée de (Limahn, 2014)



Figure 1.10 Exemple de
tourelle Lidar
Tirée de (Monniaux, 2007)

1.2.5 Scanneur Laser

Le principe de base d'un scanneur laser est la **triangulation** optique à l'aide d'un faisceau laser statique (dans la pratique on utilise une ligne laser sur l'objet) (voir Figure 1.11). Le faisceau laser est projeté sur l'objet ciblé, la lumière réfléchie est captée par des lentilles et redirigée vers une caméra (capteur). On connaît précisément la distance entre la source laser et la caméra réceptrice, on connaît l'angle d'émission, et en mesurant l'angle de réception au niveau de la lentille de collection, on peut remonter à la distance du point sur la surface de l'objet grâce à un triangle et donc à ses coordonnées dans l'espace. On peut parfois utiliser des cibles pour aider le scanneur laser à caler ses nuages de points (utile si on réalise plusieurs numérisations pour pouvoir les fusionner sur un logiciel).

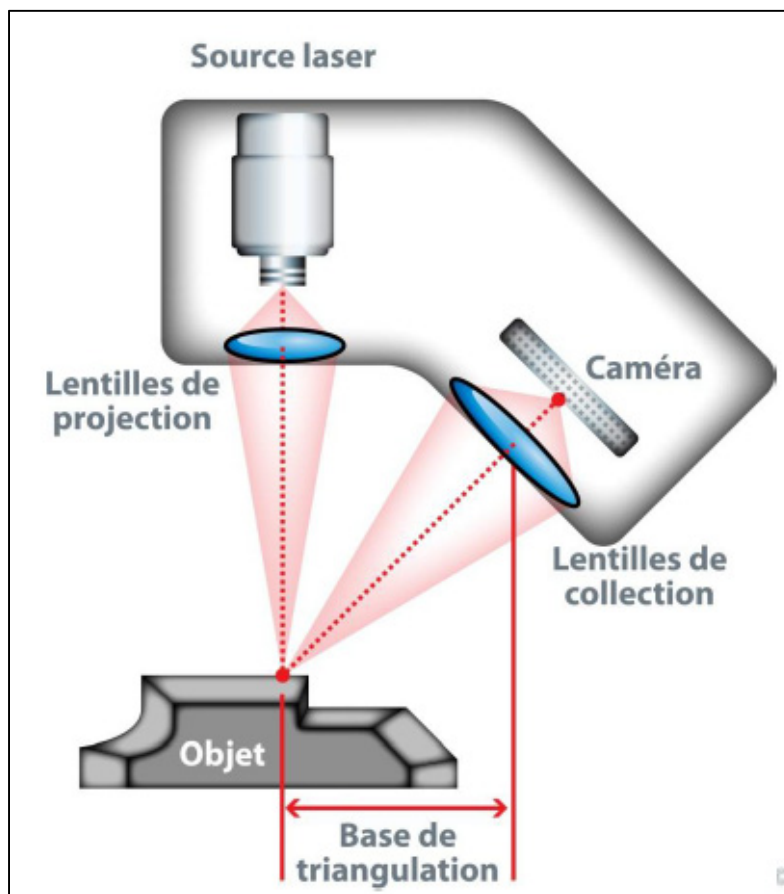


Figure 1.11 Principe de fonctionnement d'un scanneur laser
Tirée de ([InnovMetricLogiciels, 2010](#))

Les scanners laser ont généralement une faible portée, de l'ordre du mètre. Si l'objet a une forte réflectivité, plusieurs passes avec une faible vitesse peuvent être nécessaires pour pouvoir numériser de façon correcte l'objet souhaité. Pour atténuer le problème de la réflectivité, on peut disposer une fine couche de poudre de couleur mate permettant ainsi de réduire la réflectivité de l'objet.

La précision du scanner laser prend en compte la qualité et la résolution de la caméra réceptrice mais aussi la qualité du laser projeté. Les scanners laser sont des appareils portables qui tendent à devenir de plus en plus légers (plus agréable d'utilisation pour les opérateurs). Ils peuvent être totalement mobiles (par exemple : HandyScan© de Créaform ®), c'est-à-dire qu'ils s'autopositionnent par rapport à des cibles collées (pastilles circulaires généralement) sur l'objet à numériser ; ou ils peuvent être à « méthode externe de référencement » (MER), c'est-à-dire qu'ils sont repérés grâce à un appareil externe qui les traque de façon optique dans un référentiel global. L'avantage de ce dernier est que l'on peut facilement faire des fusions de nuages de points grâce au référentiel de cibles fixes. En revanche, le défaut est que les cibles disposées sur le scanner laser permettant son repérage optique doivent être toujours visibles par l'appareil de référence limitant ainsi les déplacements et obligeant de planifier soigneusement son approche de numérisation. On peut diminuer l'impact de ce défaut en positionnant plusieurs appareils de référence, augmentant ainsi le « champ de vision ».

1.2.6 Scanneur 3D à lumière structurée

Les scanners 3D à lumière structurée projettent un motif lumineux (généralement des franges) sur l'objet à numériser. Ils observent la déformation de ce motif lumineux sur l'objet grâce à une caméra. On projette suffisamment de patrons lumineux pour que chaque pixel de la caméra puisse déterminer de manière non équivoque deux vecteurs de projections afin d'obtenir des coordonnées 3D de l'objet (voir Figure 1.12). On a donc un logiciel qui analyse les images du motif lumineux déformé et peut calculer les coordonnées (x,y,z) . Les scanners 3D à lumière structurée ont l'avantage d'être très rapide et de faire beaucoup de mesures en peu de temps.

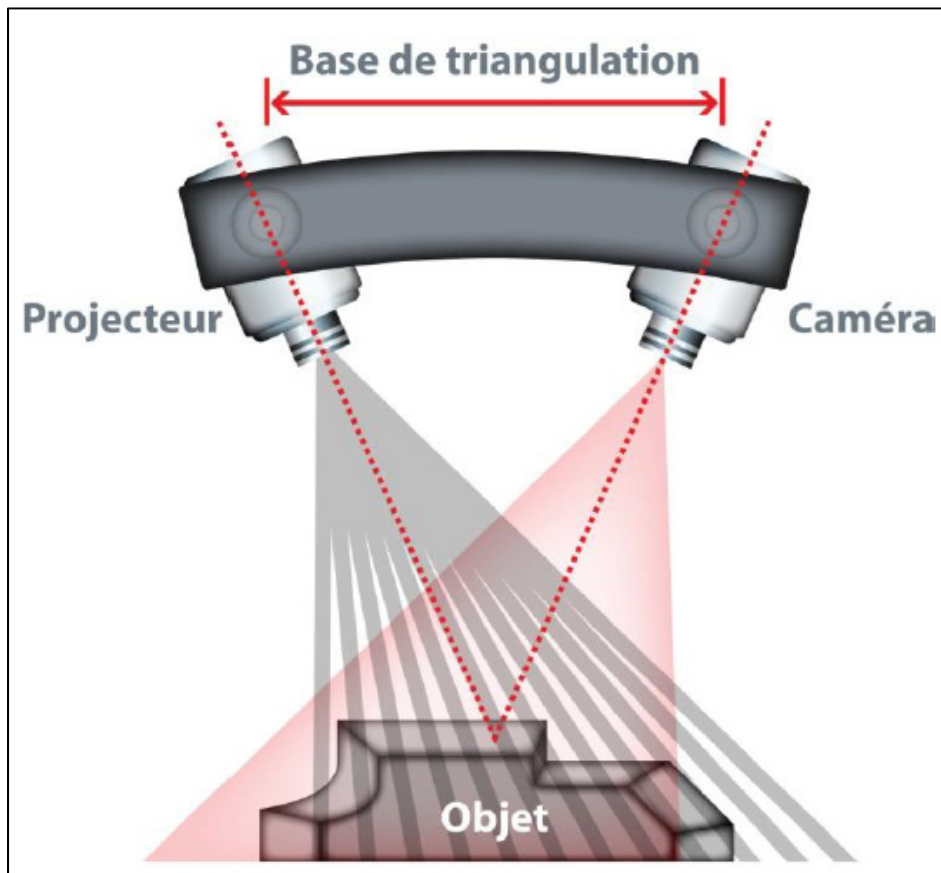


Figure 1.12 Principe de fonctionnement des scanner 3D à lumière structurée

Tirée de ([InnovMetricLogiciels, 2010](#))

1.2.7 Laser Tracer

Le *Laser Tracer* est un appareil utilisant l'interférométrie, similaire au *Laser Tracker* mais il n'a pas de système de mesure d'angle. Il permet de traquer la cible réfléchissante qui peut par exemple être montée sur le porte-outil d'une machine-outil. Son incertitude est excellente ($U(95\%) = 0.2 \mu\text{m} + L \times 0.3 \mu\text{m/m}$, où L la distance de mesure en mètre dans le cas d'un laboratoire de mesure parfait) ([Gaška et al., 2014](#)). Son interféromètre bouge sur un cardan monté sur une sphère de précision fixe servant de miroir référence qui réfléchit le faisceau laser (voir Figure 1.13). Les déviations radiales et latérales des axes de rotation mécaniques n'ont pas d'effet significatif sur la précision des mesures. Le *Laser Tracer* ne calcule donc que la distance par rapport à la cible réfléchissante, il est donc nécessaire d'utiliser une méthode de « multilatération » pour déterminer les coordonnées du point de mesure (voir 1.2.2).

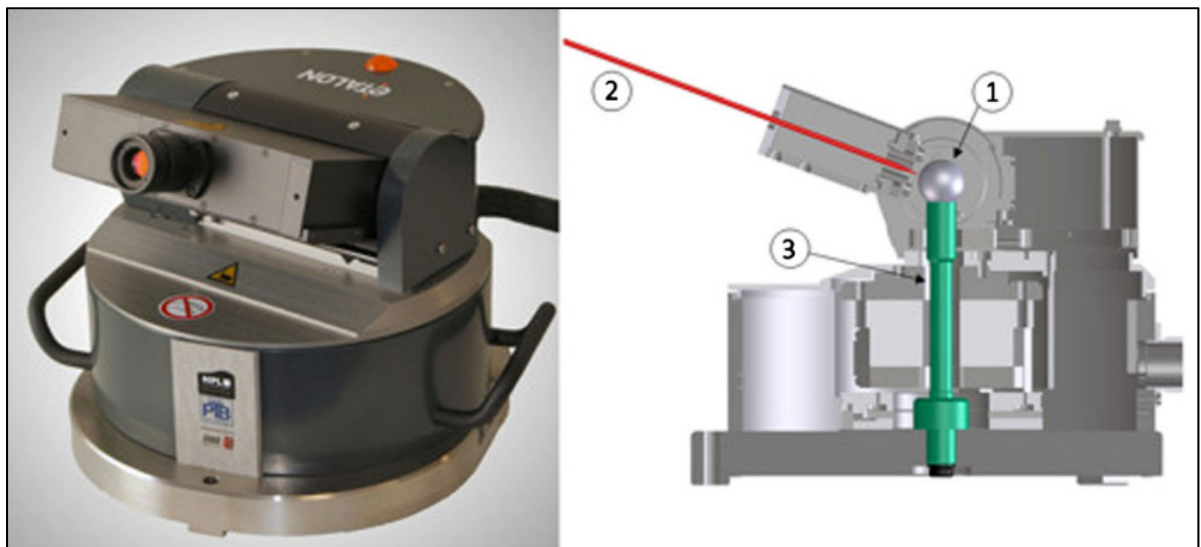


Figure 1.13 Principe de fonctionnement et exemple d'un *Laser Tracer*
Tirée de ([Gaška et al., 2014](#))⁴

⁴ 1 : sphère référence (déviations < 50 nm), 2 : faisceau laser, 3 : Colonne du *laser tracer*

1.2.8 iGPS

Le système iGPS est une solution modulable de MGE. Il permet de transformer un grand volume en un espace utilisable pour faire de la métrologie précise. On peut utiliser plusieurs stations GPS réparties dans l'espace de l'usine pour pouvoir créer le volume souhaité et y utiliser un appareil mobile (bras articulé) composé d'un palpeur et d'un scanner laser. On bénéficie donc de la numérisation par palpeur et sans contact (*voir* Figure 1.14). Ces stations vont déployer un système de GPS intérieur à l'usine permettant de localiser cet appareil mobile (ou même plusieurs, le nombre d'appareils déployables n'est pas limité) (*voir* Figure 1.15). La précision de la localisation de l'appareil mobile va jusqu'à 200 μm . De plus, ce système est très simple à mettre en place.

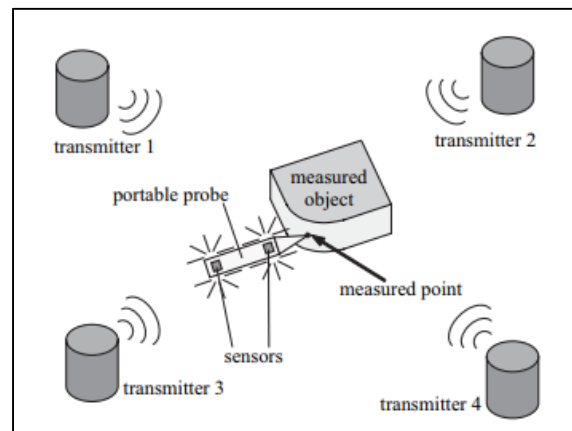


Figure 1.14 Schématisation du système iGPS
Tirée de ([Peggs et al., 2009](#))

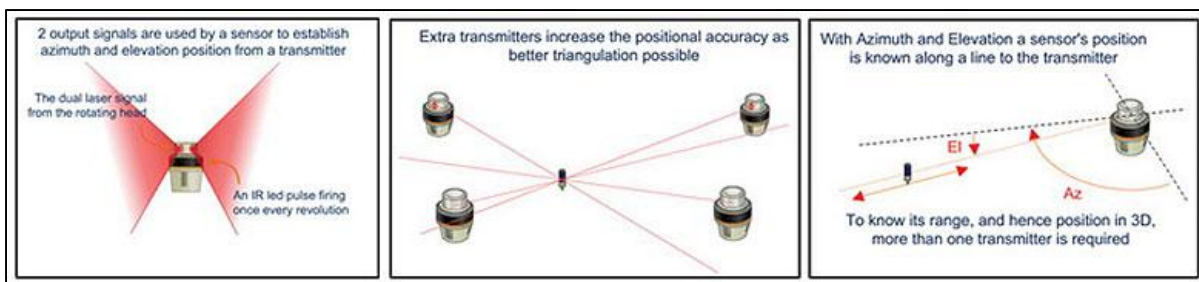


Figure 1.15 Système iGPS
Tirée de (NikonMetrology, 2016)

1.2.9 Photogrammétrie

Le principe de la photogrammétrie s'inspire de la vision humaine. En effet, à partir de deux sources d'images 2D prises à différents angles, on réalise une vision 3D. On effectue de nombreuses photos (jusqu'à 100 par secondes) et en utilisant la parallaxe obtenue entre les images acquises selon des points de vue différents, on peut reconstituer une scène 3D. Avec l'amélioration des vitesses de calcul, la photogrammétrie devient une solution intéressante. De plus, l'utilisation de cibles n'est pas requise (même si elles peuvent aider les logiciels de calage). Les volumes numérisables sont importants. Par exemple, on peut numériser de grandes dimensions telles que des bâtiments. Les appareils de photogrammétrie sont mobiles et légers (par exemple : un appareil photo de bonne qualité avec beaucoup de pixels comme sur la Figure 1.16 ou encore la possibilité d'utiliser un drone pour les paysages comme illustrée sur la Figure 1.17). On peut facilement les combiner avec d'autres systèmes. Cette méthode est souvent utilisée dans le domaine de la construction.



Figure 1.16 Appareil photo – Sigma
SD1 Merrill 46 Mpix



Figure 1.17 Exemple de reconstitution par photogrammétrie
Tirée de (Valente, 2017)

1.2.10 Combiner les systèmes

Dans un milieu comme la métrologie à grande échelle où chaque système possède ses avantages et ses inconvénients, il est possible de combiner plusieurs systèmes pour pouvoir profiter des avantages de chacun (voir Figure 1.18). On peut par exemple utiliser plusieurs *laser trackers*, un scanneur laser combiné avec un réseau de iGPS ou d'appareils de photogrammétrie. On appelle cette méthode « architecture à capteurs multiples » (Franceschini, Galetto, Maisano, & Mastrogiacomo, 2014). Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Dépasser les limites et les défauts qu'ont les systèmes individuellement;
- Couvrir toutes les plages de distance pour les mesures (crucial pour les grandes échelles);
- Améliorer les performances métrologiques (reproductibilité, répétabilité...);
- Utiliser les avantages de chaque système;
- Réduire le risque d'erreur de mesure.

Les aspects négatifs de cette méthode sont la nécessité d'avoir plusieurs systèmes métrologiques, cela implique donc un coût supplémentaire, et d'avoir une réelle stratégie d'approche de la métrologie : le choix du type de fusion des différentes sources de données rentre en compte (fusion compétitive ou fusion coopérative).

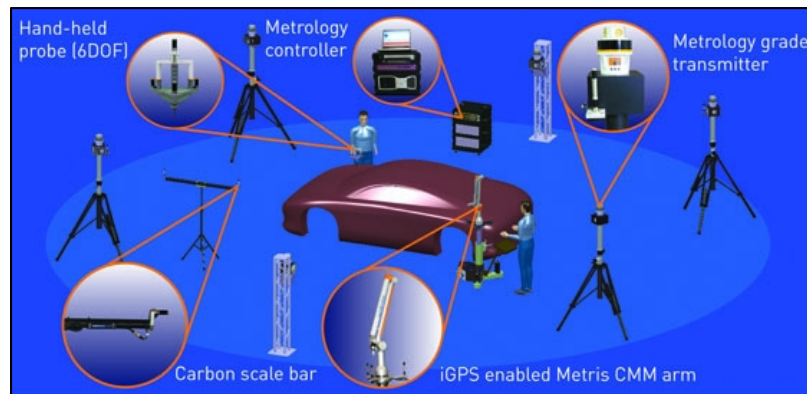


Figure 1.18 Combinaison de systèmes
Tirée de (Metris3D, 2010)

La tendance actuelle de la métrologie à grande échelle est de combiner les systèmes. On appelle cela des systèmes hybrides. De nombreux articles traitent de ce sujet (ex : (Tompalski et al., 2018), (Schmitt et al., 2016), (Franceschini et al., 2016), (Franceschini & Maisano, 2014), (Franceschini et al., 2014), (Peggs et al., 2009)).

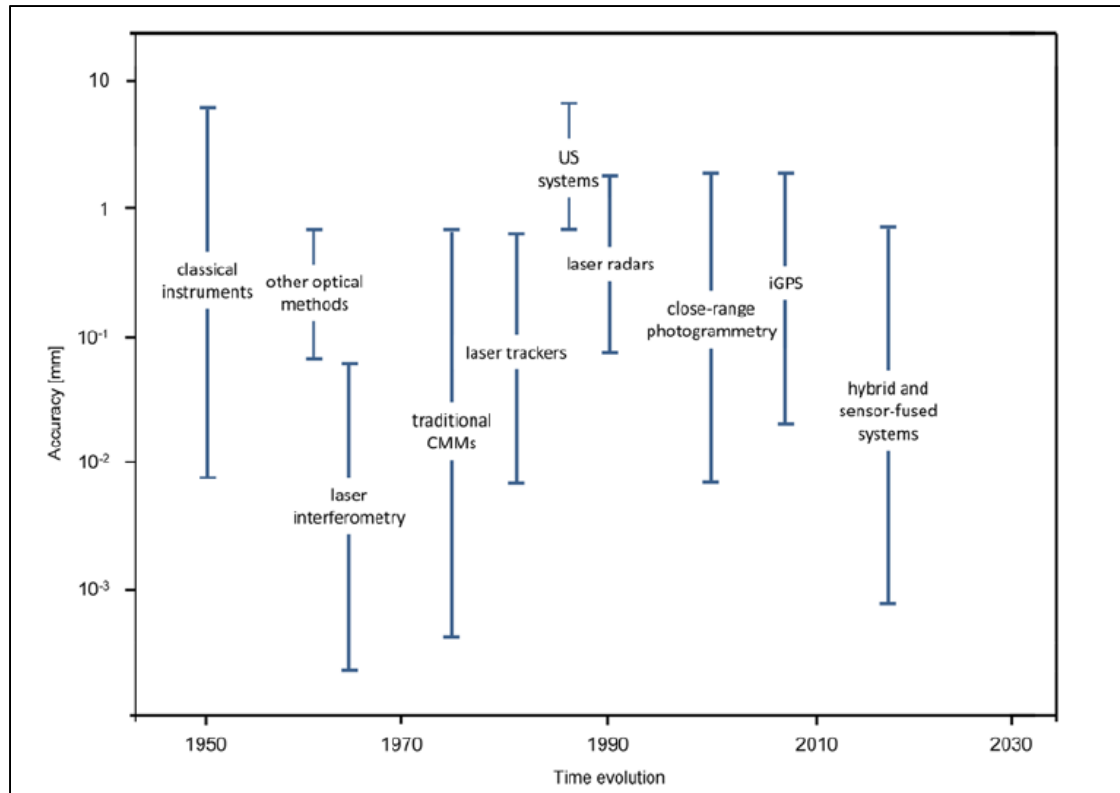


Figure 1.19 Évolution des principaux systèmes de métrologie à grande échelle au cours du temps et leur précision

Tirée de (Franceschini, Galetto, Maisano, & Mastrogiacomo, 2016)

1.3 Critères pour la sélection des technologies

Parmi toutes les technologies de métrologie à grande échelle, on doit faire un choix selon les besoins de l'application visée. Pour cela, on met en place différents critères qui pourront mener au choix d'une technologie ou plusieurs technologies parmi celles disponibles (voir Figure 1.20 et Figure 1.21).

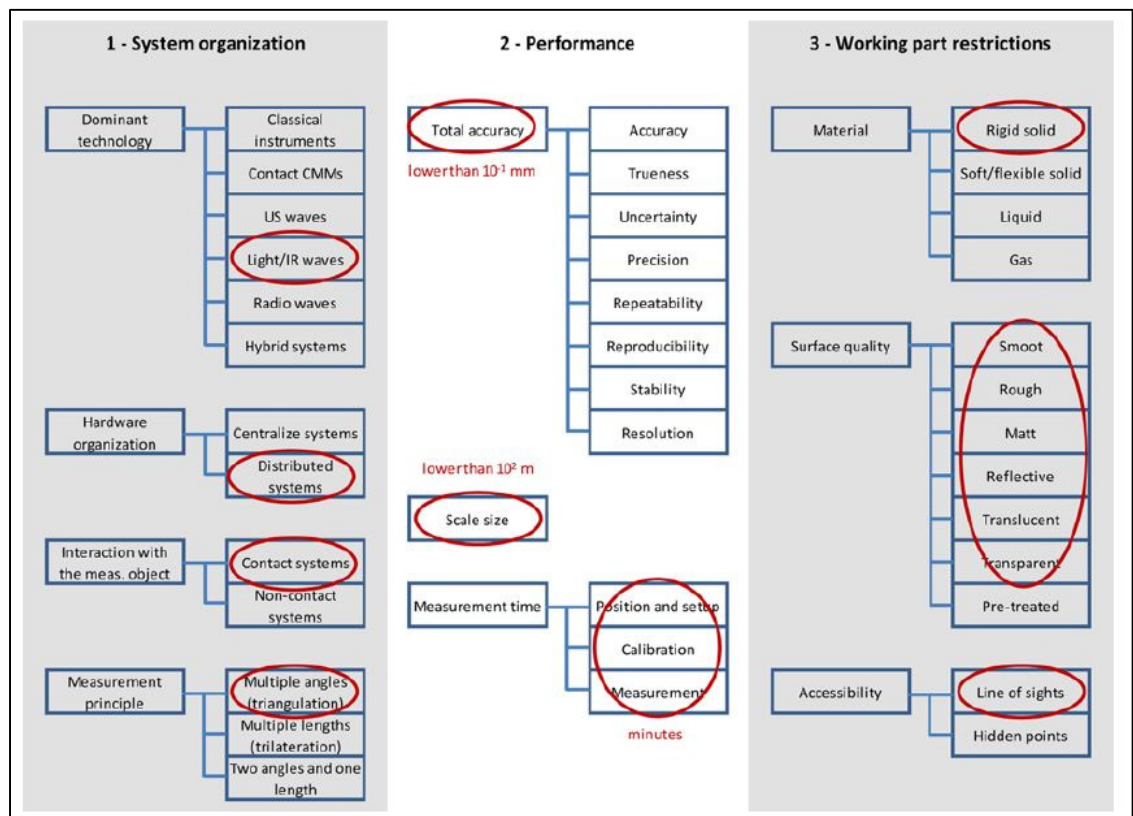


Figure 1.20 Exemple d'organisation de critères pour choisir un système⁵ (1/2)
Tirée de (Franceschini et al., 2014)

⁵ Les cercles représentent les critères du iGPS

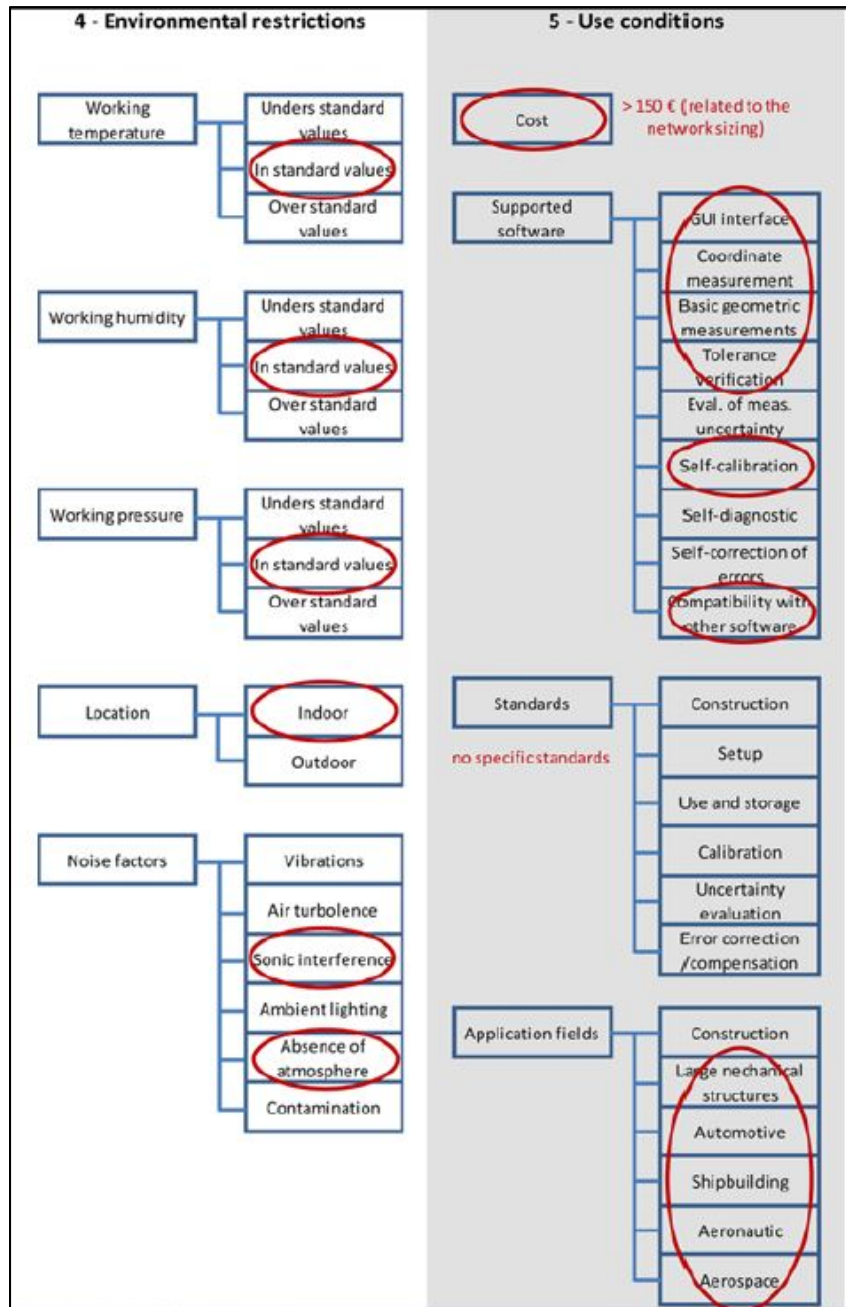


Figure 1.21 Exemple d'organisation de critères pour choisir un système⁶ (2/2)
Tirée de (Franceschini et al., 2014)

⁶ Les cercles représentent les critères du iGPS

1.3.1 Précision des systèmes de mesures

La précision est définie comme la capacité d'un capteur 3D à mesurer des objets le plus fidèlement possible. On donnera un ordre de grandeur des précisions, car les fabricants ne spécifient pas forcément à quoi correspondent les précisions qu'ils fournissent : si c'est plus ou moins ($\pm$) la précision affichée, si l'intervalle de confiance est à 95% ou à 99%, etc. De plus, les données techniques fournies correspondent souvent au cas optimal avec les conditions optimales dans le milieu optimal ([Barbero & Ureta, 2011](#)).

Tableau 1.1 Ordre de grandeur des précisions des systèmes de mesures

Système de mesure	Ordre de grandeur de la précision
MMT	$7 \mu\text{m} + L/250 \mu\text{m}$
MMT Portable	$20 \mu\text{m}$
<i>Laser Tracker</i>	$15 \mu\text{m}$ (à 2 m de distance)
<i>Laser Tracer</i>	$U(95\%) = 0,2 \mu\text{m} / \text{m} + 0.3 \mu\text{m} / \text{m}$
Scanneur Laser	$20 \mu\text{m} + 60 \mu\text{m} / \text{m}$
Lidar (Artec Ray)	1 mm (à 15 m de distance)
Scanneur 3D à lumière structurée	$300 \mu\text{m} / \text{m}$
iGPS	$200 \mu\text{m}$ sur la position de l'appareil mobile
Photogrammétrie	$15 \mu\text{m} / \text{m}$

Pour construire ce Tableau 1.1, ainsi que tous les tableaux de cette partie, nous avons visité chaque site internet des grands constructeurs du milieu de la MGE pour obtenir un ordre de grandeur des précisions de leurs systèmes de mesures.

1.3.2 Taille des pièces et volume

Chaque technologie a des caractéristiques différentes quant à la taille des pièces qu'elle peut numériser. Le volume réfère à la taille des objets pouvant être mesurés (InnovMetricLogiciels, 2010). Ce volume possible de captation des appareils peut dépendre de la manière dont ils sont repérés dans l'espace. Ainsi, un appareil fonctionnant par MER aura un volume possible de captation limité par la machine faisant son repérage. En, effet il devra être toujours visible par cette dernière.

Voici un ordre de grandeur des tailles des objets numérisables pour chaque système de mesures (*voir* Tableau 1.2).

Tableau 1.2 Ordre de grandeur des tailles de pièce numérisable

Système de mesure	Ordre de grandeur des tailles de pièce numérisable
MMT	5m × 11m × 3,5m
MMT Portable	0,2 à 10 m (volume $\approx 16 \text{ m}^3$)
<i>Laser Tracker</i>	Jusqu'à 160 m
<i>Laser Tracer</i>	0.2 - 20 m
Scanneur Laser	0,1-6 m
Lidar (Artec Ray)	Jusqu'à 110 m (pour garder une bonne précision)
Scanneur 3D à lumière structurée	0,3 à 3 m
iGPS	Autant que l'on veut
Photogrammétrie	Autant que l'on veut

La Figure 1.22 montre de façon plus visuelle le volume possible de captation pour chaque système de mesures indépendamment et lorsqu'ils utilisent des méthodes externes de référencement.

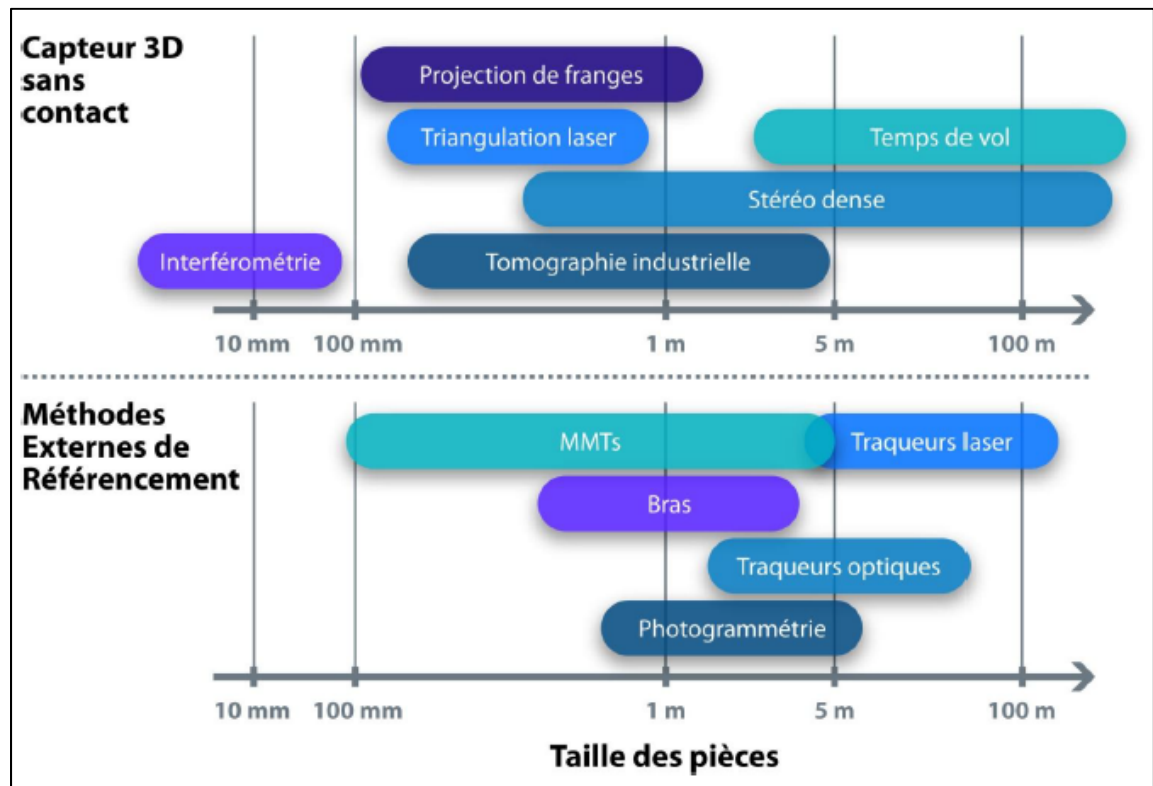


Figure 1.22 Ordre de grandeur des pièces numérisables pour chaque technique
Tirée de ([InnovMetricLogiciels, 2010](#))

1.3.3 Ergonomie et prix

Sur de grands volumes comme des usines, l'ergonomie de l'appareil est importante. L'appareil doit être facile à déployer et à manipuler. Le prix du matériel est également à prendre en compte dans le choix. L'ordre de grandeur des prix de chaque système, ainsi que leur ergonomie seront donc estimés ([Franceschini et al., 2014](#)) et compilés dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3 Évaluation de l'ergonomie et du prix
Tiré de (Franceschini et al., 2014)

Système de mesure	Portabilité	Maniabilité	Prix (k\$)
MMT	Nulle	Nulle	150-300
MMT Portable	Grande	Grande	30
<i>Laser Tracker</i>	Moyenne	Moyenne	80
<i>Laser Tracer</i>	Moyenne	Moyenne	X
Scanneur Laser	Grande	Grande	20
Lidar	Moyenne	Moyenne	135
Scanneur 3D à lumière structurée	Moyenne	Moyenne	12-20 (<i>appareil portable</i>)
iGPS	Grande	Moyenne	>200 (<i>dépend du nombre de stations utilisées</i>)
Photogrammétrie	Grande	Grande	10

1.3.4 Les influences sur les systèmes de mesure causant des incertitudes de mesures

Lors du processus de mesure, de nombreuses influences extérieures peuvent être prises en compte. Chaque élément parasite va impacter la mesure finale avec une incertitude que l'on doit (ou non) prendre en considération selon son ordre de grandeur. La Figure 1.23 montre un ensemble d'influences parasites selon leur source pouvant causer une incertitude de mesure finale.

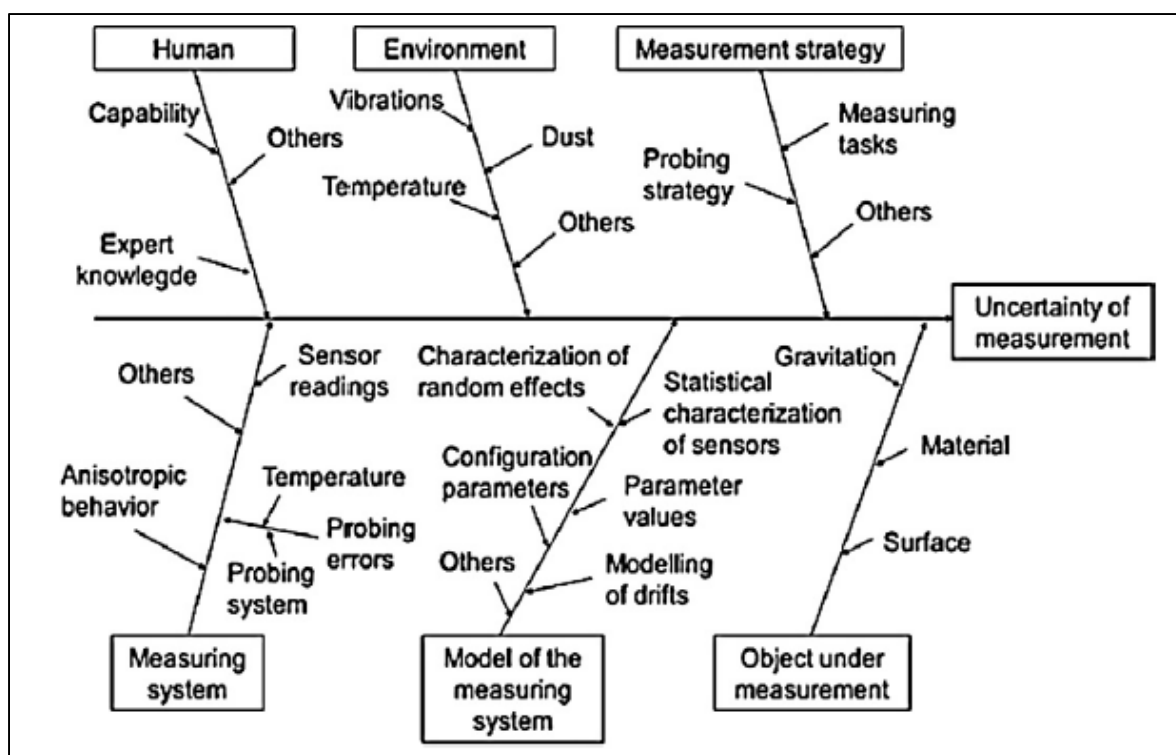


Figure 1.23 Exemple d'influences parasites sur le processus de mesure
Tirée de ([Schmitt et al., 2016](#))

Nous nous intéresserons surtout à la sensibilité à la réflectivité de la surface à mesurer (plage dynamique). En effet, toutes les technologies n'ont pas la même capacité de mesurer des coordonnées sur une surface d'une certaine réflectivité (voir Figure 1.24)

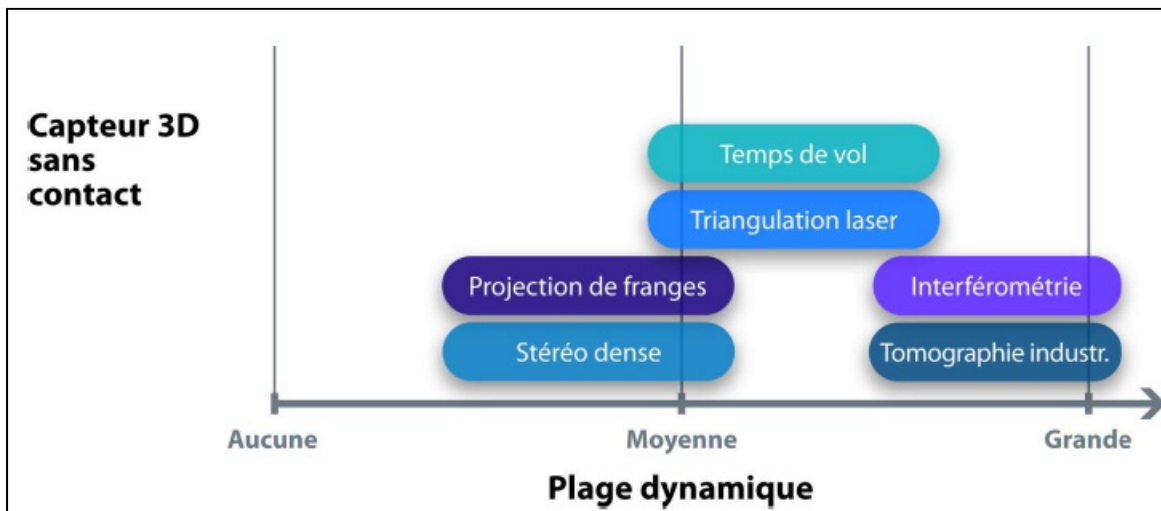


Figure 1.24 Comparaison des sensibilités à la réflectivité selon la technologie
Tirée de ([InnovMetricLogiciels, 2010](#))

Ainsi, la réflectivité peut poser un problème dans la captation tridimensionnelle dans le cadre de notre projet. Comme on peut le voir sur la Figure 1.25 ci-dessous qui illustre le nombre de points relevés sur une pièce en aluminium. Cette pièce possède une partie rendue mate et une partie laissée naturelle, la réflectivité de la surface est donc élevée. Cette figure montre bien que la réflectivité est un facteur important à prendre en compte dans une tuyauterie industrielle composée de tuyaux en aluminium, acier inoxydable ou cuivre. De même, la luminosité peut être un facteur qui influe plus ou moins selon la technologie employée.

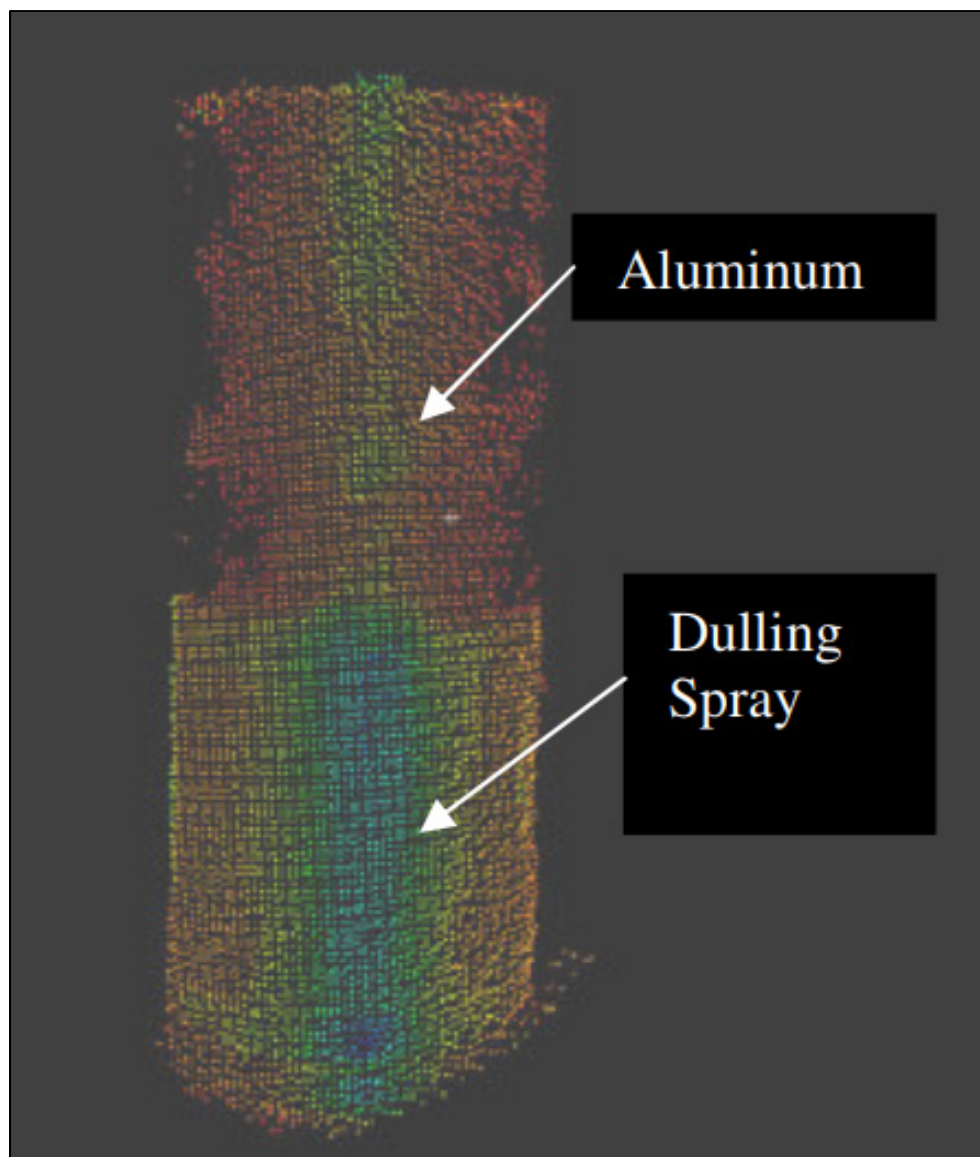


Figure 1.25 Nuage de points relevé par un Lidar montrant
l'influence de la réflectivité
Tirée de ([Fidera, Chapman, & Hong, 2004](#))

1.3.5 Topologie : centralisé / à distribution

Le Tableau 1.4 décrit le type de gestion des données de chaque système de mesures. Cela pourrait être un critère dans le choix des technologies.

Tableau 1.4 Topologies des systèmes
Construit à partir de ([Schmitt et al., 2016](#))

Système de mesure	Type de gestion
MMT	Centralisé
MMT Portable	Centralisé
<i>Laser Tracker</i>	Centralisé / à distribution
<i>Laser Tracer</i>	Centralisé
Scanneur Laser	Centralisé
Lidar (Artec Ray)	Centralisé
Scanneur 3D à lumière structurée	Centralisé
iGPS	À distribution
Photogrammétrie	À distribution

1.4 Inventaire d'appareils de métrologie à grande échelle

Pour cet inventaire d'appareils de métrologie à grande échelle disponibles, nous nous concentrerons sur les grands fabricants du domaine pour obtenir les caractéristiques de chaque système de mesures:

- FARO Technologies® (États-Unis) ;
- Leica Geosystems® (Allemagne) ;
- Creaform® (Canada) ;
- Nikon Metrology® (Japon).

Nous essaierons au maximum de fournir les mêmes données pour chaque système dans les tableaux suivant. Néanmoins, certaines caractéristiques sont propres à certains systèmes.

1.4.1 Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)

Les MMT utilisées pour la MGE sont très volumineuses et fixes. Elles ne seront pas envisageables dans le cadre de notre projet.



Figure 1.26 MMT grande échelle : Leitz PMM-G

Tableau 1.5 Caractéristiques MMT grande échelle

Système	Précision	Étendues de mesure possible
Leitz PMM-F 30-20-16©	$7 \mu\text{m} + L/250 \mu\text{m}$	3000 x 2000 x 1200 mm à 8000 x 4500 x 3000 mm

1.4.2 Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) portable

Une MMT portable est un dispositif qui doit être repéré par un système extérieur. Ce système va repérer dans l'espace la MMT portable afin de localiser les points de palpation que la MMT portable effectuera. Ainsi, nous obtenons une bonne précision. Cependant, nous conservons l'inconvénient du contact obligatoire pour effectuer les mesures



Figure 1.27 HandyProbe© de Creaform®

Tableau 1.6 Caractéristiques MMT Portable

Système	Exactitude	Répétabilité par points	Performance volumétrique	Performance volumétrique avec MaxSHOT 3D Next™ Elite©	Poids
HandyProbe©	Jusqu'à 0.020 mm	0.058 mm	0.078 mm	0.044 mm + 0.015 mm/m	500 g

Il existe d'autres MMT plus ou moins portables. En effet, le FARO® Super 6DoF TrackArm© est un arbre mobile que l'on peut disposer proche de l'objet à numériser. Il est repéré par un *laser tracker*. Sur ce bras, un palpeur est fixé et un scanneur laser permettant de faire les mesures tout en ayant une MER.

1.4.3 Laser Tracker

Nous comparerons les appareils de deux entreprises : Leica® et Faro®. Leurs caractéristiques sont assez semblables et les appareils complémentaires compatibles aussi.



Figure 1.28 Leica® Absolute Tracker AT960



Figure 1.29 Faro® Vantage

Tableau 1.7 Comparatif Laser Trackers

Système	Précision	Portée	Poids	Remarques
Leica® Absolute Tracker AT960	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ (cibles réfléchissantes)	160 m	< 14 kg	Compatible avec le système 6DoF (6 degrés de liberté, système combinant LT et appareil portable (palpage et scanner laser))
Faro® Vantage S	$15 \mu\text{m} @ 2 \text{ m}$	160 m		Système 6DoF aussi, précision de localisation de l'appareil mobile de $80 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m/m}$

1.4.4 Lidar

Le Lidar peut être utilisé de deux façons différentes. Il peut soit être monté sur une tourelle comme sur la Figure 1.10, ce sera le cas des caractéristiques du Lidar de la Figure 1.30 que l'on retrouvera dans le Tableau 1.8. Il peut soit être monté sur un drone comme sur la Figure 1.31.



Figure 1.30 Lidar Artec Ray©



Figure 1.31 Can Drone M210 M8 Snoopy
Lidar©

Tableau 1.8 Caractéristiques Lidar

Systeme	Précision	Portée	Poids	Informations	Classe du laser
Artec Ray	<0.7 mm @ 15 m	110 m	5.74kg	Longueur d'onde : 1550 nm	Classe 1
Can Drone M210 M8 Snoopy Lidar	± 20 mm @ 50 m	150 m	1.7 kg	440 000 points / sec 3 lasers 15-17 minutes d'autonomie de vol	Classe 1 Classe 2

1.4.5 Laser Tracer

Le *Laser Tracer* n'est pas très répandu dans l'industrie. De plus, le prix élevé de ces appareils et leur utilisation, nous pousse à l'écartier.

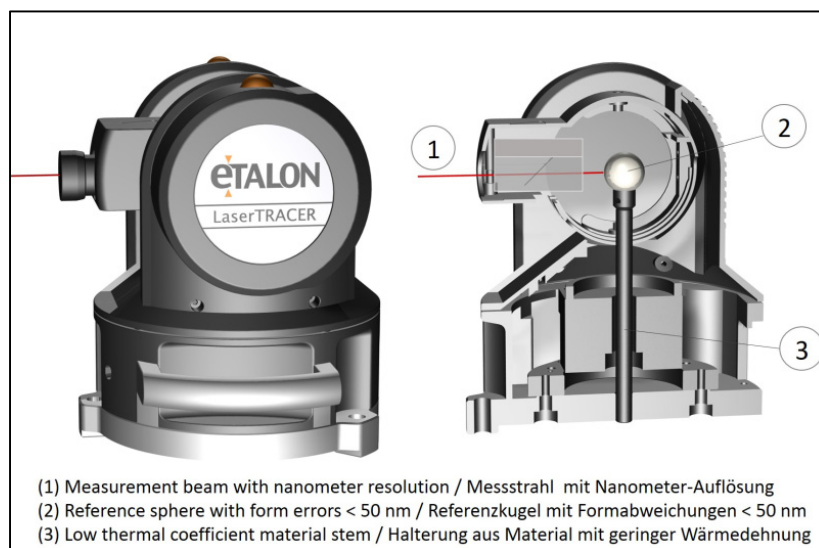


Figure 1.32 LaserTRACER-NG Etalon®

Tableau 1.9 Caractéristiques Laser Tracer

Système	Précision	Portée	Poids	Plage des angles (Azimut / élévation)
LaserTRACER-NG	U (95%) = 0,2 μm /m +0.3 $\mu\text{m}/\text{m}$	0.2 - 20 m	8.5 kg	-225° - 225° -35° - 85°

1.4.6 Scanneur Laser

Les scanners laser peuvent être montés sur des bras robotiques pour faire des inspections automatisées sur des lignes d’assemblages comme la gamme de scanneur laser de la Figure 1.33. Ils peuvent aussi être portables comme ceux de la gamme de Créaform® de la Figure 1.34.

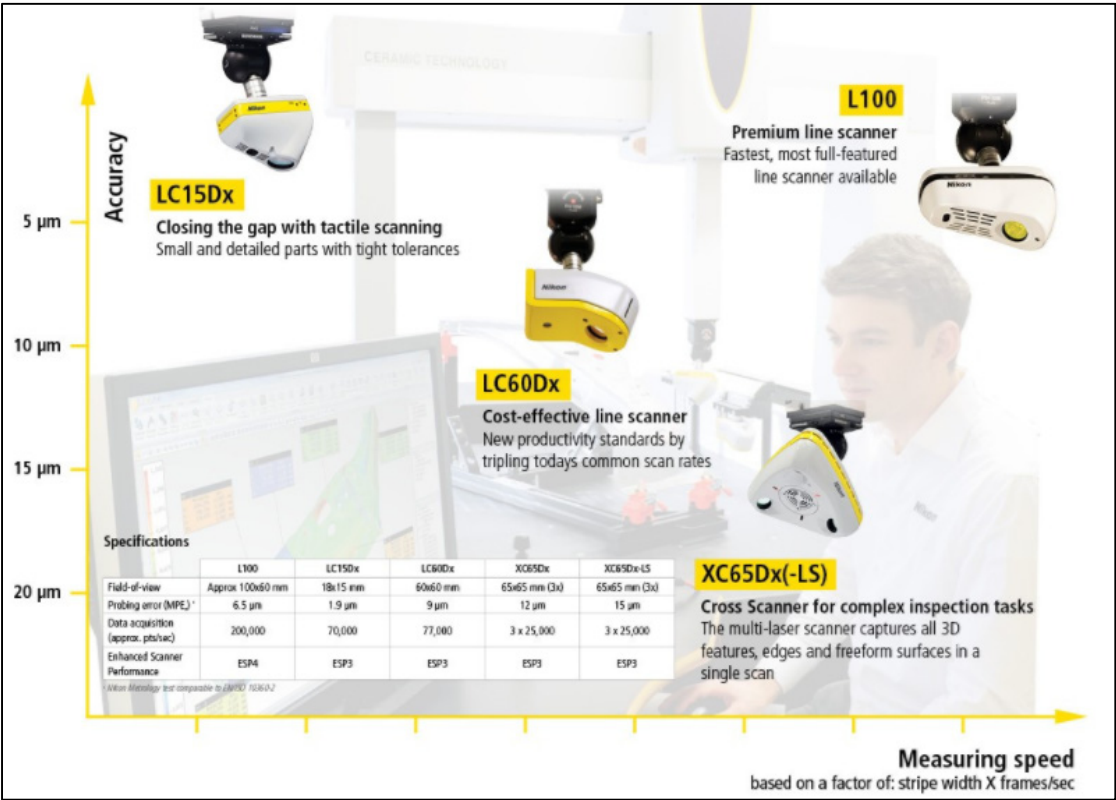


Figure 1.33 Gamme de scanneur laser Nikon Metrology®



Figure 1.34 Gamme de scanneurs laser Creaform ®
HandyScan 3D© / MetraScan 3D© (avec MER)

Tableau 1.10 Comparaison des scanneurs laser Creaform®

Système	Performance volumétrique	Performance volumétrique Avec MaxSHOT Next™Elite©	Résolution	Fréquence de mesure	Taille des pièces	Profondeur de champ	Poids
HandyScan 3D©	0.020 mm + 0.060 mm/m	0.020 mm + 0.015 mm/m	0.050 mm	480 000 mesures/s	0.1 – 4 m	250 mm	850 g
MetraScan 3D©	0.078 mm sur 16.6 m ³	0.044 mm + 0.015 mm/m	0.050 mm	480 000 mesures/s	0.2 – 6 m	200 mm	1.38 kg

1.4.7 Scanneur 3D à lumière structurée

Les scanneurs 3D à lumière structurée que nous comparerons sont portables (*voir* Figure 1.35 et Figure 1.36). Ils sont utilisables à une main.



Figure 1.35 Artec Eva©



Figure 1.36 Scanneur 3D à lumière structurée
de Creaform ® : Go!Scan 50©

Tableau 1.11 Comparaison des caractéristiques scanneur à lumière structurée portable

Système	Précision	Résolution	Fréquence de mesure	Taille des pièces recommandée	Poids
Artec Eva©	0.1 mm + 0.03%/0.1m	0.500 mm	2 000 000 points/s	0.4 – 1.0 m	850 g
Go!Scan50 3D©	0.300 mm/m	0.500 mm	550,000 mesures/s	0.3 – 3.0 m	950 g

1.4.8 iGPS

Les iGPS sont des appareils permettant de créer un réseau d'unités pour localiser des appareils mobiles de numérisation. Ils localisent ces appareils mobiles avec une précision jusqu'à 200 μm (le niveau de confiance n'est pas indiqué sur le site internet Nikon® mais cela permet d'avoir un ordre de grandeur).



Figure 1.37 iGPS Nikon Metrology®

1.4.9 Photogrammétrie

Pour exploiter la numérisation tridimensionnelle par photogrammétrie, on utilise des appareils photo (possibilité de les monter sur des drones pour numériser depuis les airs, utile pour le domaine de la construction) avec une très bonne résolution. En effet, plus les pixels sont nombreux plus les logiciels de traitement de photogrammétrie pourront regrouper des pixels en commun. De plus, un grand-angle augmentera la largeur de la prise de vue. Les unités de photogrammétrie peuvent aussi **servir d’appareils de repérage** pour des appareils mobiles de numérisation.



Figure 1.38 Système optique de mesure de coordonnées Creaform® : MaxSHOT 3D ©
(se combine avec d’autres systèmes de numérisation)

Tableau 1.12 Caractéristiques système de photogrammétrie

Système	Performance volumétrique	Déviations moyenne	Taille des pièces recommandée	Poids
MaxSHOT 3D©	0.015 mm/m	0.005 mm/m	Jusqu’à 10 m	790 g

1.4.10 Comparatif global des différents systèmes de mesures

Nous pouvons résumer cet inventaire dans le Tableau 1.13 en prenant les caractéristiques communes des différents systèmes de mesures.

Tableau 1.13 Comparatif global des systèmes de mesures

	Nom du système	Précision	Portée	Poids
MMT	Leitz PMM-F 30-20-16	$7 \mu\text{m} + L/250 \mu\text{m}$	<i>Taille de la pièce maximale 3000 x 2000 x 1200 mm à 8000 x 4500 x 3000 mm</i>	
MMT Portable	HandyProbe©	Jusqu'à 0.020 mm	Dépend du MER	0,5 kg
Laser Tracker	Leica® Absolute Tracker AT960	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ (cibles réfléchissantes)	160 m	<14 kg
	Faro® Vantage S	15 μm @ 2 m	160 m	
LiDAR	Artec Ray	<0.7 mm @ 15 m	110 m	5,74 kg
	Can Drone M210 M8 Snoopy Lidar	$\pm 20 \text{ mm}$ @ 50 m	150 m	1,7 kg
Laser Tracer	LaserTRACER-NG	U (95%) = 0,2 $\mu\text{m}/\text{m}$ + 0.3 $\mu\text{m}/\text{m}$	0.2 - 20 m	8,5 kg
Laser Scanner	HandyScan 3D©	0.020 mm + 0.060 mm/m	250 mm 0.1 – 4 m	0,85 kg
	MetraScan 3D©	0.078 mm sur 16.6 m	200mm Taille des pièces recommandée 0.2 – 6 m	1,38 kg
Scanneur 3D à lumière structurée	Artec Eva©	0.1 mm + 0.03%/0,1 m	Taille des pièces recommandée 0.4 – 1.0 m	0,85 kg
	Go!Scan50 3D©	0.300 mm/m	Taille des pièces recommandée 0.3 – 3.0 m	0,95 kg
Photogrammétrie	MaxSHOT 3D©	0.015 mm/m	Taille des pièces recommandée Jusqu'à 10 m	0,79 kg

1.5 Conclusion

L'objectif de cette revue de la littérature est de décrire les principes de fonctionnement des méthodes de numérisation tridimensionnelle, ainsi que de résumer les technologies utilisées dans la métrologie à grande échelle. La métrologie à grande échelle est un domaine qui devient de plus en plus important et dont les technologies sont encore sujettes à évoluer. L'absence de norme participe au fait que les fabricants ne sont pas toujours explicites et uniformes sur les caractéristiques de leurs appareils et sur les conditions dans lesquelles les performances annoncées sont obtenues. De plus, la traçabilité métrologique qui devrait être très importante et n'est pas encore très répandue dans les numérisations 3D. En effet, il serait important de pouvoir remonter la trace de vérification métrologique du matériel que l'on utilise pour s'assurer de sa conformité.

Pour choisir la technologie à utiliser pour de la numérisation 3D à grande échelle, il faut savoir quels critères sont importants dans l'étude. Pour cela, des comparaisons d'ordres de grandeur de critères des technologies ont été faites, permettant de s'orienter vers une technologie ou une combinaison de technologies pour pallier les lacunes de chacune.

Enfin, un inventaire d'appareils a été fait, technologie par technologie pour avoir une idée des fabricants présents sur le marché et sur les performances de chacune.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET MATÉRIELS

À la suite de l'étude de la littérature et d'après les critères de notre projet, nous avons procédé par élimination pour déterminer les systèmes que nous testerions. Les systèmes de mesures par contact ont été directement éliminés. Les *laser tracker* (*laser tracer*) ne sont pas pertinents ici. Ainsi, il ne nous reste que les LiDAR, les scanneurs 3D à lumière structurée et la photogrammétrie. La Figure 1.25 montrant la sensibilité du LiDAR à la réflectivité de la surface d'une pièce nous a poussé à l'éliminer. Nous garderons donc les scanneurs 3D à lumière structurée et la photogrammétrie comme systèmes à tester pour notre projet. Nous avons effectué les expériences en deux étapes.

La première étape s'est faite en laboratoire de métrologie où l'environnement est entièrement contrôlé (laboratoire de classe 4, température de 20°C, pression positive et humidité entre 30% et 50%). Les conditions sont donc optimales pour vérifier la conformité métrologique des systèmes sélectionnés.



Figure 2.1 Laboratoire de métrologie de l'ÉTS

La deuxième étape a été une simulation *in situ* qui a été réalisée dans le stationnement de l'ÉTS pour reproduire les conditions existantes d'une usine réelle.



Figure 2.2 Stationnement de l'ÉTS



Figure 2.3 Tuyauterie industrielle

2.1 Cahier des charges

Le Tableau 2.1 regroupe les fonctions et critères importants pour le projet.

Tableau 2.1 Cahier des charges

Fonctions	Critères	Niveau
Fonction principale 1 (FP1) : Réduire le temps nécessaire pour la prise de mesures	Inférieur aux délais actuels	Délais actuels de 1 semaine à plusieurs semaines
FP2 : Améliorer la précision de la prise de mesures	Meilleure précision que la précision actuelle sur la mesure globale	< 3 mm d'écart
Fonction critère 1 (FC1) : Avoir un prix raisonnable	\$ CAD	< 50 000 \$CAD
FC2 : Fonctionne avec les surfaces présentes	Doit pouvoir fonctionner sur des surfaces réfléchives	
	Ne pas déposer de poudre sur les surfaces, laisser les surfaces propres	
FC3 : Prise en main facile	Ne nécessite pas de qualifications particulières, juste des formations	
FC4 : Fonctionne à distance	Peut fonctionner à distance, car la tuyauterie peut être en hauteur	
FC5 : Fonctionne sur de grandes usines	La solution proposée doit pouvoir être applicable sur de grandes usines	Plusieurs centaines de m ² . La hauteur varie.

2.2 Matériels

À la suite de l'étude de la littérature et du cahier des charges, nous explorerons deux solutions de numérisation tridimensionnelle dans le cadre de ce projet : le scanneur 3D à lumière structurée et la photogrammétrie.

2.2.1 Scanneur 3D à lumière structurée



Figure 2.4 Go!Scan 50© de Creaform®

L'ÉTS possède ce scanneur 3D à lumière structurée (voir Figure 2.4) Nous avons choisi ce scanneur plutôt que le scanneur Artec Eva© car il semble mieux adapté pour des grands volumes (voir Tableau 1.11). Il est assez compact ($150 \times 171 \times 251$ mm pour 950 g) et peut donc facilement être utilisé à bout de bras (voir Figure 2.5). Cela est nécessaire pour numériser une tuyauterie souvent située en hauteur. Ce système s'affranchit du problème de la luminosité en projetant lui-même sa propre lumière puisqu'il envoie une lumière blanche (DEL). Il effectue 550 000 mesures par seconde. Il possède un mode « sans-cible » mais il est conseillé d'utiliser des cibles pour aider le scanneur à se repérer lors de la numérisation. Il est donc conseillé de toujours avoir 3 cibles visibles par le scanneur dans la surface de numérisation (380×380 mm). On vérifiera si ce scanneur 3D à lumière structurée est performant pour capter les surfaces réfléchissantes et ainsi surmonter ce problème majeur.



Figure 2.5 Mallette du Go!Scan 50©

2.2.2 Photogrammétrie

On a cherché à avoir le plus de pixels utilisables par un logiciel de photogrammétrie à usage libre et avoir un objectif grand-angle pour capter le plus largement la scène (Valente, 2017). Le matériel a été loué chez Lozeau® à Montréal. L'appareil photo choisi (voir Figure 2.6) est un boîtier Canon EOS 5DS R (50,6 millions de pixels (MP)) avec un objectif Canon EF 16-35 mm f/2.8L III USM.



Figure 2.6 Appareil photo utilisé pour la photogrammétrie

Le logiciel de photogrammétrie que l'on utilisera pour l'expérimentation est « *Autodesk Recap Photo*© » (Kumar, 2015). Le principe de ce logiciel est simple : on téléverse les photos prises avec une stratégie photogrammétrique, c'est-à-dire faire les photos sur un laps de temps assez court pour éviter les changements de l'environnement, ne pas utiliser le zoom, diversifier les points de vue pour pouvoir recréer la scène en 3D, le logiciel reconstruit la scène en 3D sur les serveurs de l'entreprise et on peut ensuite télécharger les fichiers 3D reconstruits. La version étudiante a été utilisée (limite à 100 photos par rendu contre 1000 photos pour la version payante). Ce logiciel fonctionne grâce à un système d'abonnement.

2.3 Expérimentations en laboratoire de métrologie

Lors des expériences en laboratoire de métrologie (*voir* Figure 2.8), un ensemble d'échantillons fourni par TUYO® a servi de support d'expérimentation (*voir* Figure 2.7). Cet ensemble est composé de tuyaux que TUYO® utilise lors des installations de tuyauterie, ce sont donc les tuyaux représentatifs. Les relevés sont donc faits avec la réflectivité à laquelle TUYO® est confrontée. Nous travaillerons sur des tuyaux rigides uniquement.



Figure 2.7 Ensemble de tuyaux fournis par TUYO® appelé par la suite « échantillon »

Tableau 2.2 Liste des matériaux des tuyaux de l'échantillon

Numéro du tuyau	Matériaux
1	PVC
2	Acier
3	Cuivre
4	Acier (rouillé)
5	PVC
6	PVC
Charnières de fixation	Acier inoxydable



Figure 2.8 Installation dans le laboratoire de métrologie

2.3.1 Choix du logiciel de vérification

Deux logiciels de rétro-ingénierie ont été utilisés. Celui du fabricant du scanneur 3D à lumière structurée, *VxModel*© et celui qui est utilisée dans les cours de métrologie de l'ÉTS, *PolyWorks*©. Il a fallu déterminer lequel serait le meilleur pour ensuite confirmer la précision des systèmes utilisés dans ce projet.

Pour déterminer quel logiciel utiliser, plusieurs mesures manuelles ont été effectuées à l'aide du ruban à mesurer et du pied à coulisse sur les tuyaux de l'échantillon : les diamètres et les longueurs. En effet, les diamètres et les longueurs sont des éléments importants du relevé de mesures sur le terrain de notre partenaire industriel. Ce sont aussi les données que l'on cherchera à extraire lors du processus de rétro-ingénierie. De ces mesures on a calculé des diamètres « moyens » et des longueurs « moyennes » que l'on a considérés comme « valeurs de référence ». Ensuite, le système à lumière structurée et le système photogrammétrique ont numérisé l'échantillon de tuyaux. Le rendu 3D de chacun a été importé dans les deux logiciels de rétro-ingénierie pour en extraire des cylindres parfaits à partir du maillage (voir Figure 2.10 et Figure 2.11). Il suffit de relever les diamètres de ces cylindres et de les comparer entre eux (voir Figure 2.9). On estimera si les valeurs sont cohérentes entre-elles. Les valeurs de référence permettent de voir si les systèmes sont dans l'ordre de grandeur de la réalité.

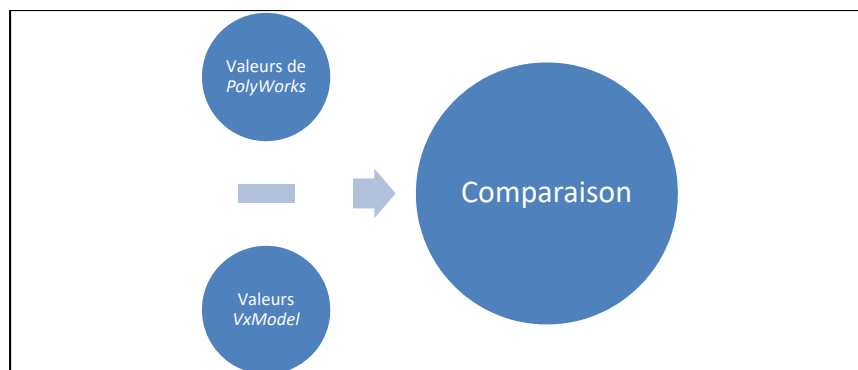


Figure 2.9 Comparaison des logiciels de rétro-ingénierie

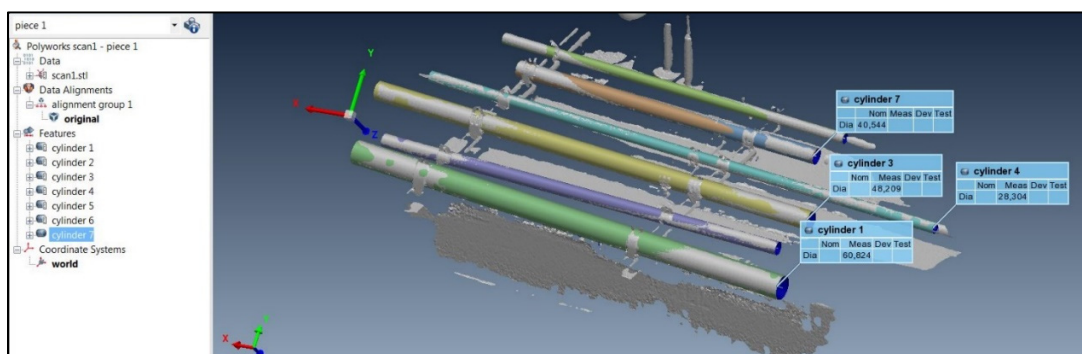


Figure 2.10 Capture d'écran du logiciel *PolyWorks*©

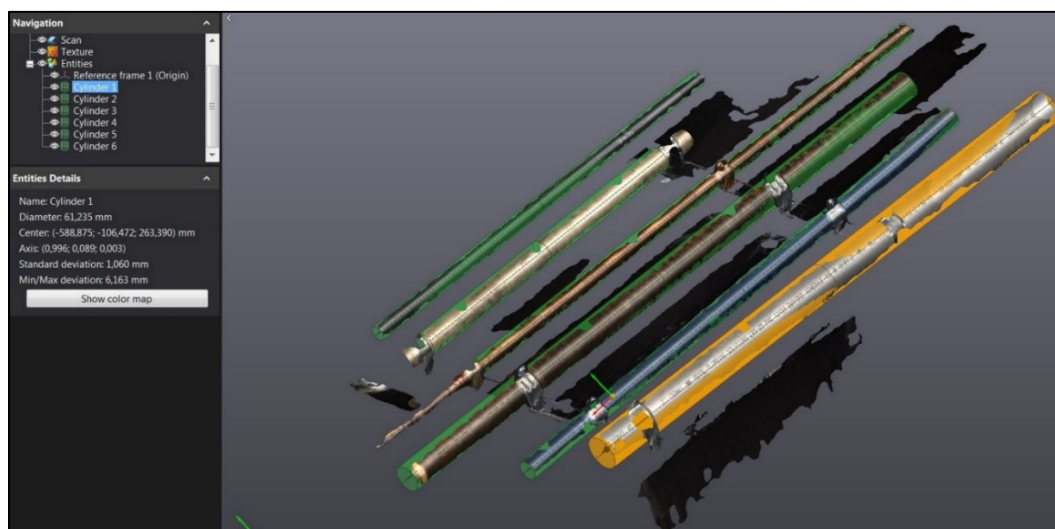


Figure 2.11 Capture d'écran du logiciel *VxModel*©

2.3.2 Confirmation de la précision du matériel

La confirmation de la précision des systèmes repose sur le même principe que le choix des logiciels. Les diamètres des cylindres extraits grâce au logiciel choisi sont soustraits aux « valeurs de référence » afin d’obtenir un écart pour estimer la précision des deux systèmes et vérifier si cela est conforme avec le cahier des charges (*voir* Figure 2.12). On utilisera ensuite des pourcentages pour évaluer plus aisément si l’on est proche de la valeur de référence.

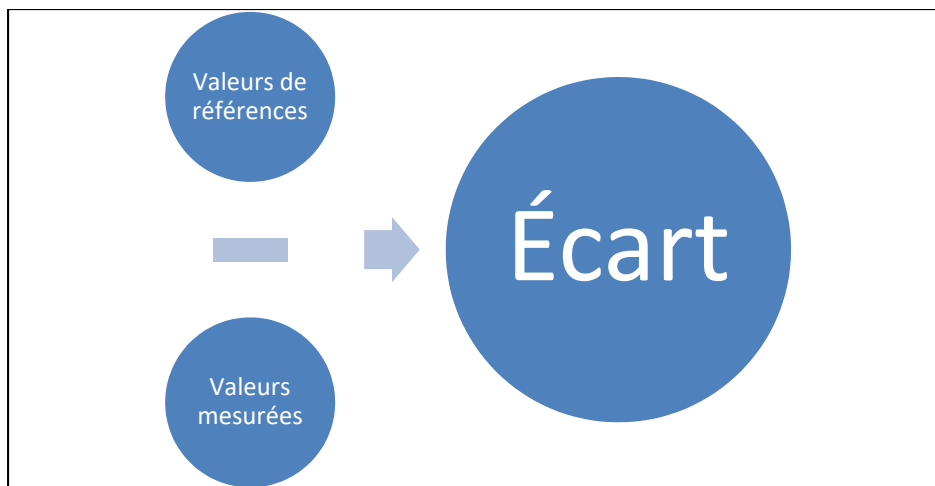


Figure 2.12 Schéma explicatif des calculs de précision

2.4 Expérimentations en conditions réelles

Après avoir confirmé que les pistes de solutions étaient assez précises pour le cahier des charges, des expériences ont été réalisées dans le stationnement de l'ÉTS pour tester les systèmes dans des conditions se rapprochant davantage de celles d'une usine que le laboratoire de métrologie. En effet, les conditions n'y sont pas aussi optimales que dans un laboratoire de métrologie, où plusieurs facteurs sont régulés comme la pression, la température, l'éclairage, l'espacement entre les tuyaux, et la disposition de l'échantillon. La surface ciblée à numériser dans cette situation est donc beaucoup plus importante, c'est ainsi plus proche du besoin de TUYO®, la hauteur des tuyaux est accessible, la température est de 26°C, tous les tuyaux ne sont pas particulièrement bien éclairés et peu espacés.

2.4.1 Numérisation grâce à un scanner 3D à lumière structurée

L'installation sur place de ce système est assez rapide, de l'ordre de la dizaine de minutes (*voir* Figure 2.14). Il faut tout d'abord un accès à une prise électrique pour pouvoir brancher le scanner portable, le traitement se fait sur un ordinateur portable. Une cinquantaine de cibles ont été collées pour aider le scanner à se repérer dans l'espace et accélérer la numérisation (*voir* Figure 2.13). Le scanner est capable de se passer de cibles normalisées et se repérer grâce aux cibles dites « naturelles » de l'objet à numériser. Cependant, la numérisation devient plus laborieuse et des déviations peuvent arriver. On peut le constater sur la Figure 2.15 où des cibles sont collées sur la zone de gauche, mais pas sur la zone de droite. Le tuyau dans la réalité suit la ligne pleine rouge, mais lors de la captation il y a une déviation le long de la ligne en pointillés verts. Le cercle de la Figure 2.15 met cela en évidence en soulignant que le même tuyau ne se rejoint pas. Une stratégie de numérisation est utile lors de ce genre de numérisation. En effet, il est intéressant de réfléchir à un « chemin » de numérisation pour pouvoir tout numériser en conservant toujours 3 cibles visibles par le scanner.

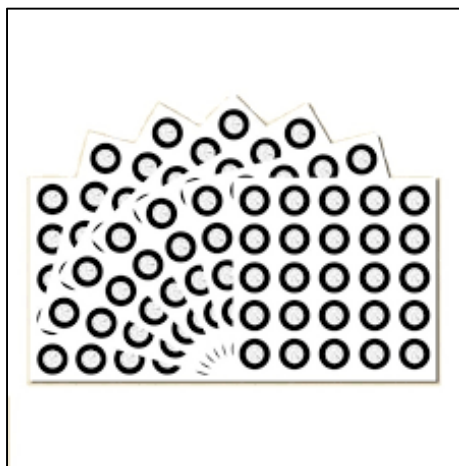


Figure 2.13 Cibles normalisées aidant la numérisation

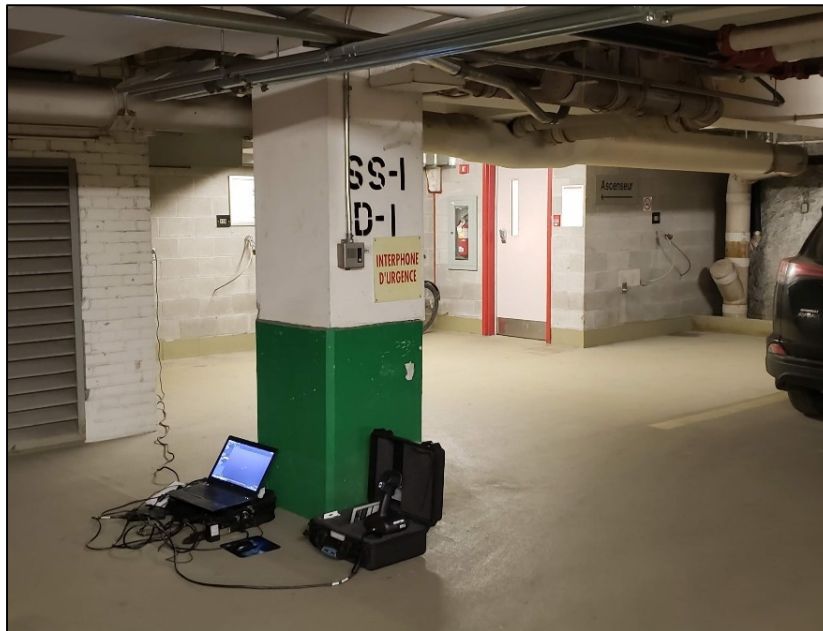


Figure 2.14 Installation dans le stationnement

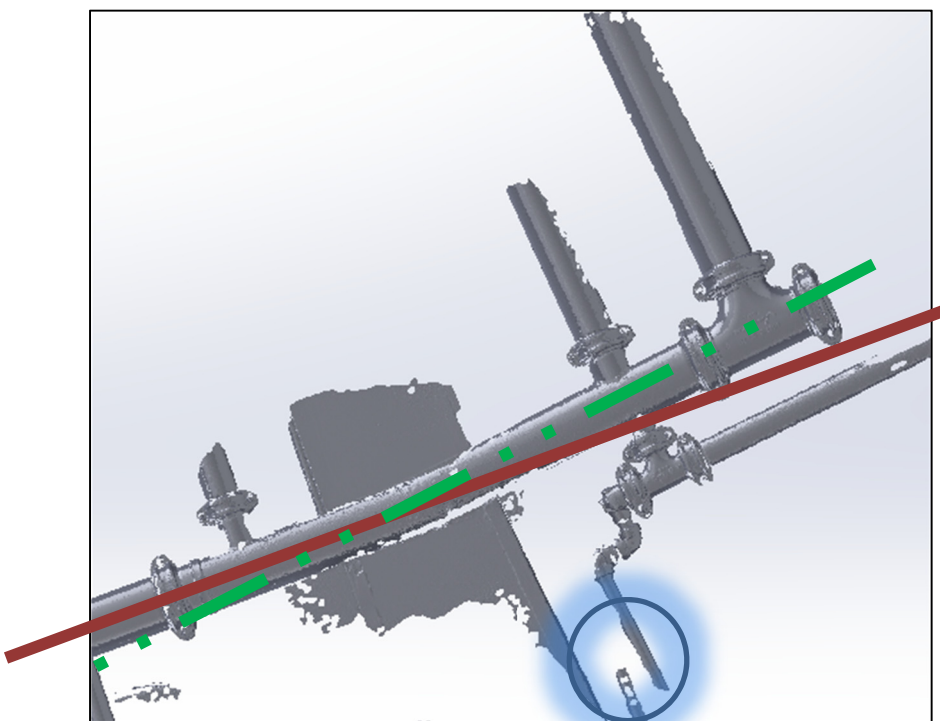


Figure 2.15 Déviation de la numérisation créée par l'utilisation du mode "cibles naturelles"

2.4.2 Numérisation grâce à la photogrammétrie

L'installation sur place de ce système est encore plus rapide puisqu'il ne nécessite qu'un appareil photo portable. Les cibles précédemment collées pourront aider à la convergence lors du traitement des photos, car ce sont des points communs aux photos faciles à distinguer. Pour cette méthode, il suffit donc de prendre un certain nombre de photos (avec le logiciel utilisé : 100 photos pour la version étudiante et 1000 pour la version professionnelle). Ces photos doivent être prises avec peu de décalage entre elles afin de pouvoir reconstruire la scène facilement. Il faut penser à couvrir toute la scène pour pouvoir créer un rendu 3D cohérent avec la réalité. Il faut aussi utiliser un repère dont on connaît une longueur qui servira d'échelle par la suite. En effet, le résultat nécessite une mise à l'échelle.

Pour l'estimation du temps de traitement, il dépend de plusieurs facteurs. Le téléversement des photos sur le logiciel *Autodesk Recap Photo*© dépend de la connexion internet disponible. Le traitement des photos en ligne prend quelques heures pour être ensuite disponible au téléchargement par l'utilisateur.

2.5 Traitement des données relevées

Les deux systèmes de numérisation tridimensionnelle permettent d'obtenir des nuages de points. Ces nuages de points seront importés dans le logiciel *SolidWorks Premium*© qui dispose d'un module « *ScanTo3D* » permettant de transformer un nuage de points brut en un maillage reconstruit, et même d'en extraire des formes géométriques simples. On choisira la version « Premium » de ce logiciel car c'est la seule à disposer du module « *ScanTo3D* ». Ce maillage reconstruit est ensuite utilisé avec le module « *Routing* » de *SolidWorks*© permettant de faire de la conception assistée par ordinateur de tuyauteries industrielles et d'en réaliser les plans utiles pour effectuer les découpes précises hors site.

Le choix du logiciel s'est porté sur *SolidWorks*© suite à la consultation de forums internet spécialisés dans la CAO tels que Lynkoa (<https://www.lynkoa.com/>), 3D Scan (<https://www.3dscanforum.org/index.php>) ou encore Direction Industry (<http://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/logiciel-tuyauterie-73491.html>), mais aussi par l'observation d'entreprises de tuyauterie industrielle et chaudronnerie.

2.5.1 Transformation du nuage de points en maillage

Les systèmes de numérisation peuvent fournir directement des rendus 3D sous forme de maillage. Cependant, on ne pourrait pas exploiter ces maillages sur le logiciel de CAO, car il existe une limitation de taille de fichier lors de l'importation. Elle est ainsi généralement dépassée par la grandeur des volumes que l'on souhaite numériser. Pour *SolidWorks*®, la limite d'importation est de 24 Mo pour les fichiers STL binaire et de 138 Mo pour les fichiers STL ASCII.



Figure 2.16 Illustrations d'un nuage de points et d'un maillage triangulaire
Tirée de (Creaform®, 2014)

On utilisera donc les nuages de points obtenus par les systèmes de numérisation. Pour pouvoir travailler ces nuages et faire de la rétro-ingénierie, il faut les transformer en maillage (voir Figure 2.16 pour l'aspect d'un nuage de points et d'un maillage d'une même pièce). On les importe donc dans *SolidWorks*®.

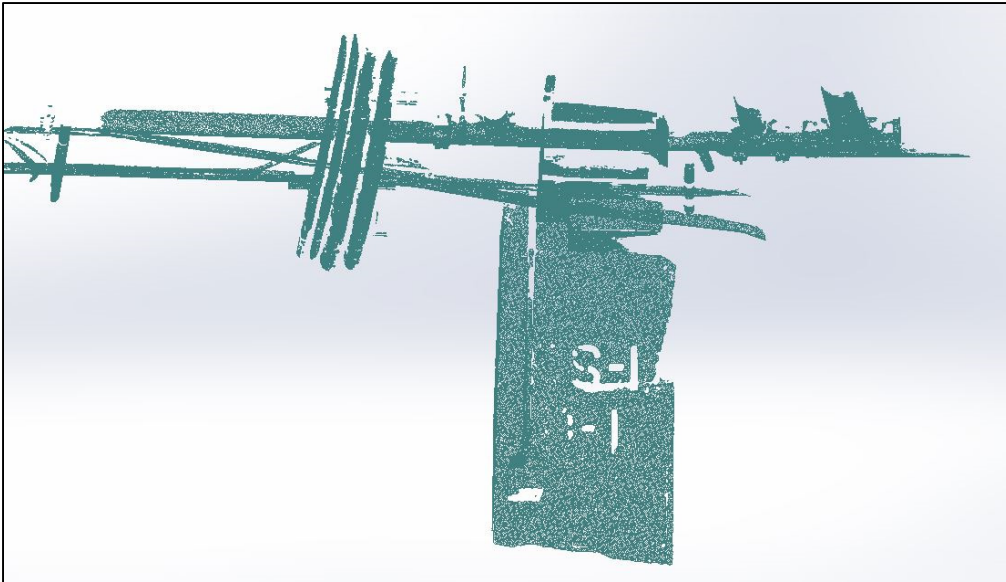


Figure 2.17 Nuage de points importé

On utilise le complément « *ScanTo3D* » de *SolidWorks*© pour pouvoir transformer ce nuage de points (voir Figure 2.17) en un maillage exploitable. Un assistant guide toute la procédure et permet plusieurs manipulations sur ce nuage de points (voir Figure 2.18). On peut tout d'abord nettoyer manuellement le nuage de points grâce à des outils de sélection (rectangle, lasso magnétique, pinceau, etc.) cela permet de supprimer des données parasites (voir Figure 2.19). Il existe ensuite un outil de suppression du bruit et de simplification, c'est un outil automatique et facultatif permettant d'alléger le nombre de points du nuage, il va réduire le nombre de points d'un certain pourcentage ou pour atteindre un nombre cible (voir Figure 2.20 et Figure 2.21). Le logiciel va ensuite donner un aperçu du futur maillage. Pour finaliser ce maillage, il propose une option permettant de remplir les trous dans le maillage (voir Figure 2.22 et Figure 2.23). On obtient ainsi un maillage d'une meilleure finition.

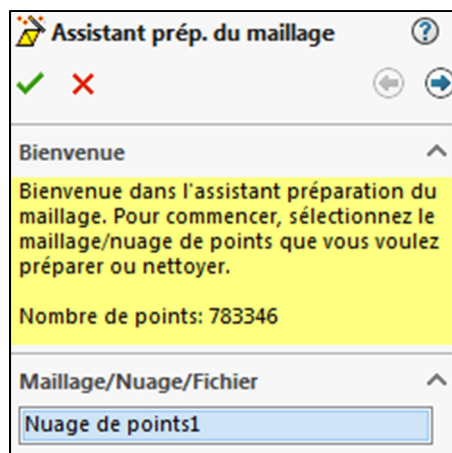


Figure 2.18 Assistant préparation du maillage

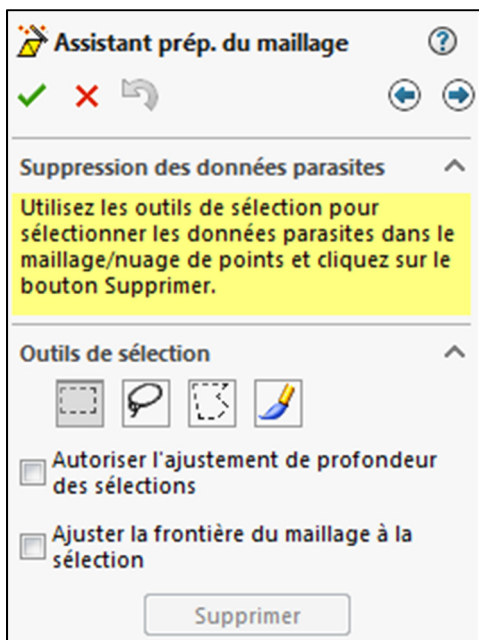


Figure 2.19 Nettoyage manuel du nuage de points

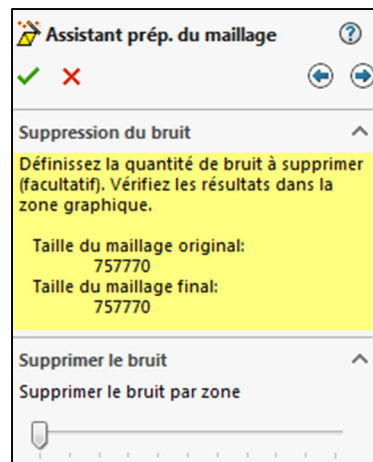


Figure 2.20 Suppression du bruit du nuage de points

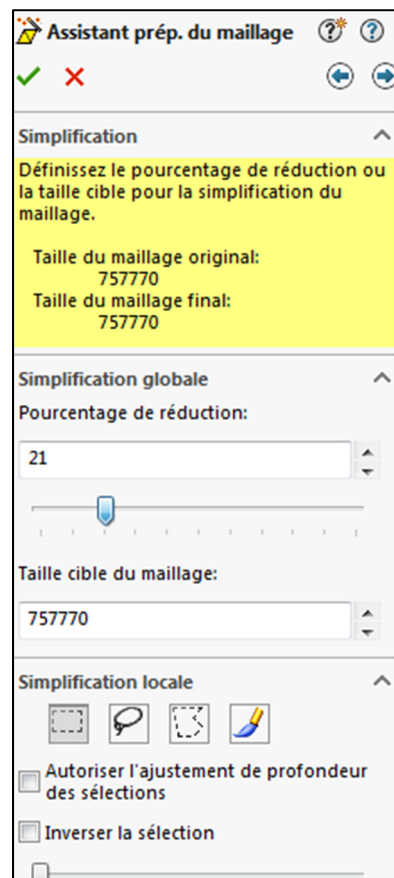


Figure 2.21 Simplification: réduction du nombre de points

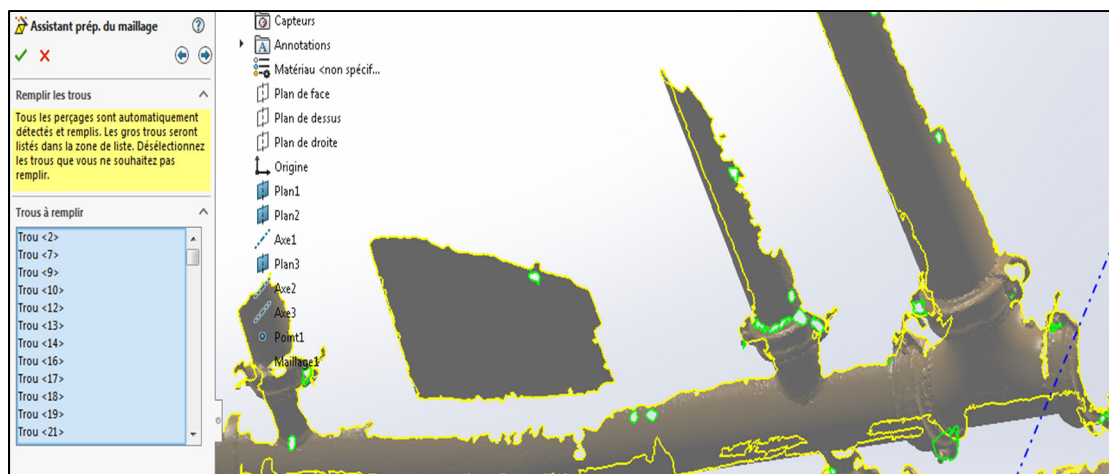


Figure 2.22 Option "remplir les trous" (avant)

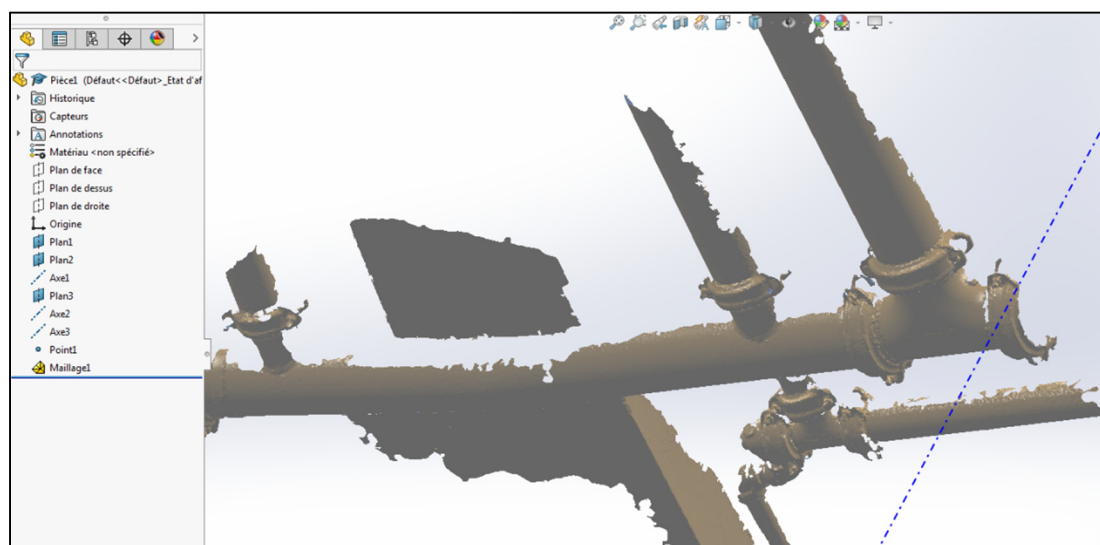


Figure 2.23 Option "remplir les trous" (après)

2.5.2 Exploitation du maillage

Pour ensuite exploiter ce nouveau maillage obtenu, il existe aussi un assistant du complément « ScantTo3D » : l'assistant surfacique (voir Figure 2.24). Cet assistant permet de reconnaître des formes géométriques simples telles que des plans, des cylindres, des cônes, des sphères, des tores, à partir d'un maillage (voir Figure 2.25). De cette reconnaissance, le logiciel va créer ces entités avec lesquelles on pourra travailler. On conserve tout de même le reste du maillage, car cela permet d'examiner l'encombrement du reste de la tuyauterie (voir Figure 2.26). De plus, les tuyauteries ne sont pas composées uniquement de formes simples, il y a des coudes, des brides et d'autres composants que l'assistant ne peut pas reconnaître de façon précise et dont on veut conserver les informations.

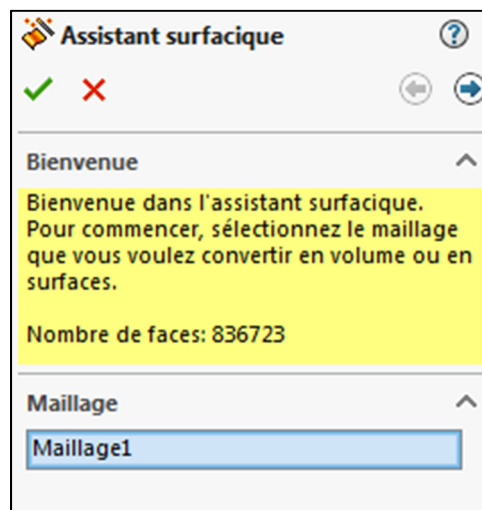


Figure 2.24 Assistant surfacique

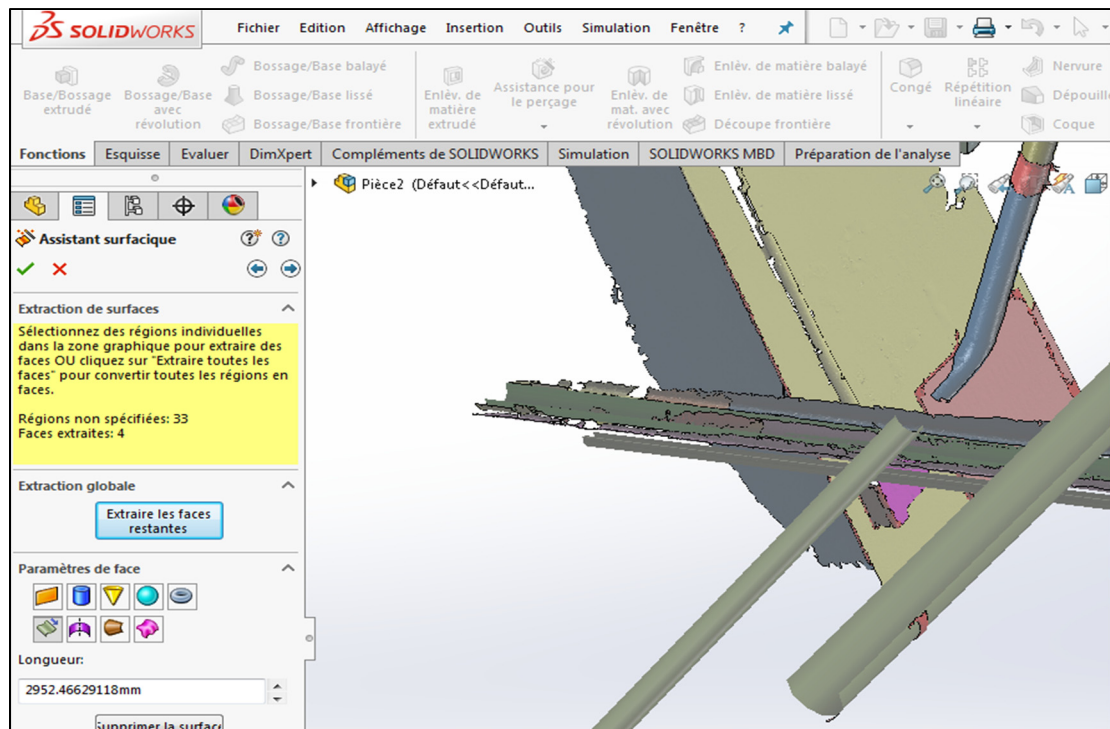


Figure 2.25 Extraction des surfaces

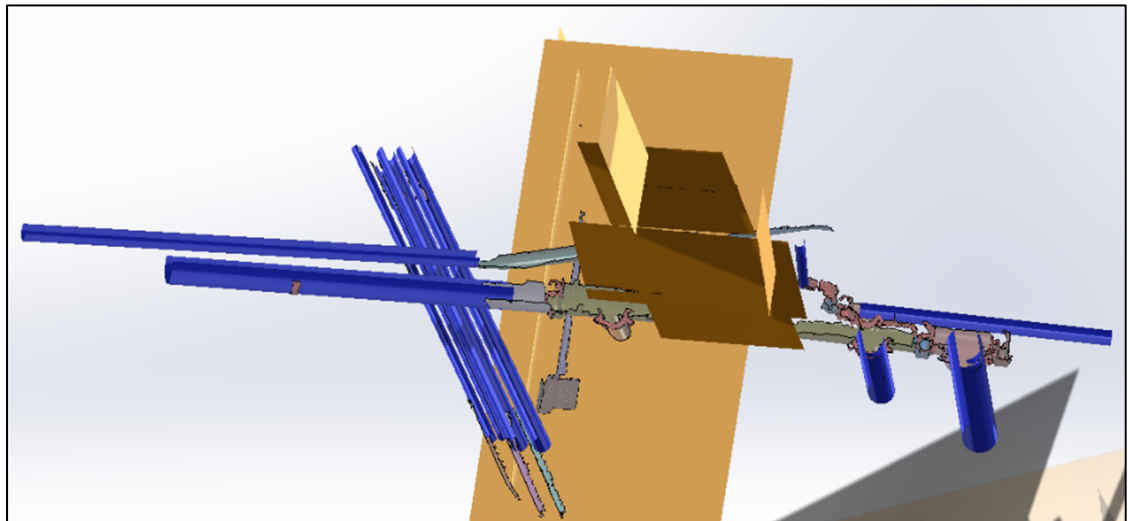


Figure 2.26 Surfaces extraites

La Figure 2.27 résume de façon claire les étapes et possibilités qu'offrent le module *ScanTo3D*.

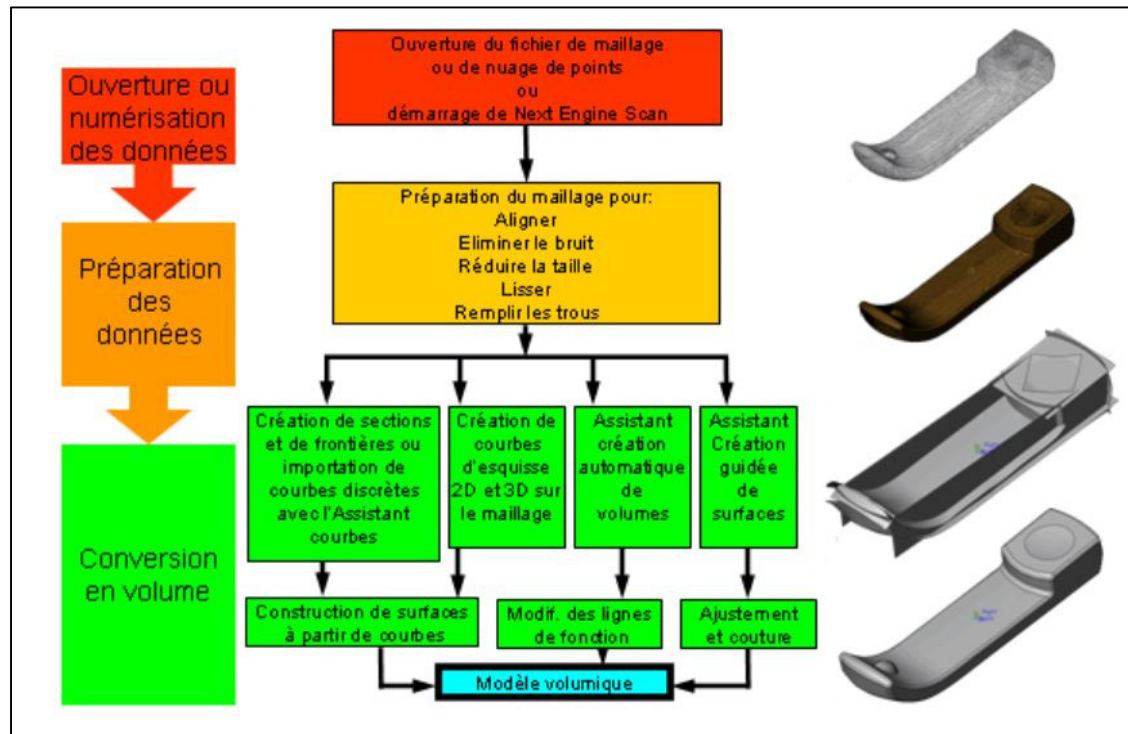


Figure 2.27 Schéma du fonctionnement du module *ScanTo3D*
Tirée de (SolidWorksHelp, 2012)

2.5.3 Routage

On a désormais un maillage exploitable et des entités géométriques de base (cylindres, plans, ...). On peut donc travailler avec le complément de routage « *Routing* » de *SolidWorks*© qui permet d'accéder à toute une bibliothèque d'éléments de tuyauterie et de réaliser des tuyauteries rapidement tout en ayant toutes les informations des normes. On commence par importer les tuyaux normalisés de la bibliothèque correspondant aux cylindres extraits du maillage. On les contraint sur ces derniers pour qu'ils soient coaxiaux et de la bonne longueur (voir Figure 2.28). On ne peut donc le faire que sur des sections droites de la tuyauterie. Les coudes ou autres éléments seront gardés comme information pour l'encombrement. Une fois cette étape réalisée pour toute la tuyauterie numérisée, on peut travailler sur les modifications souhaitées tout en ayant visuellement tous les autres tuyaux ou objets encombrants le chemin. Après avoir effectué tout le chemin de tuyauterie, il suffit de faire une mise en plan des sections de tuyaux pour pouvoir les envoyer à la découpe où les différents composants sont indiquées sur le plan, ainsi que les données précises et souhaitées (voir Figure 2.29).

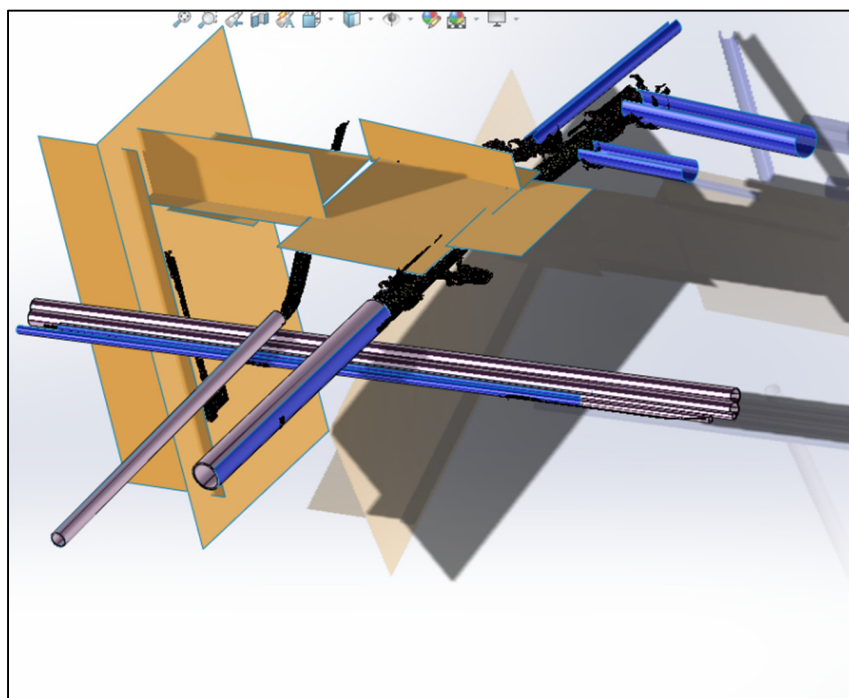


Figure 2.28 Tuyaux normalisés constraints

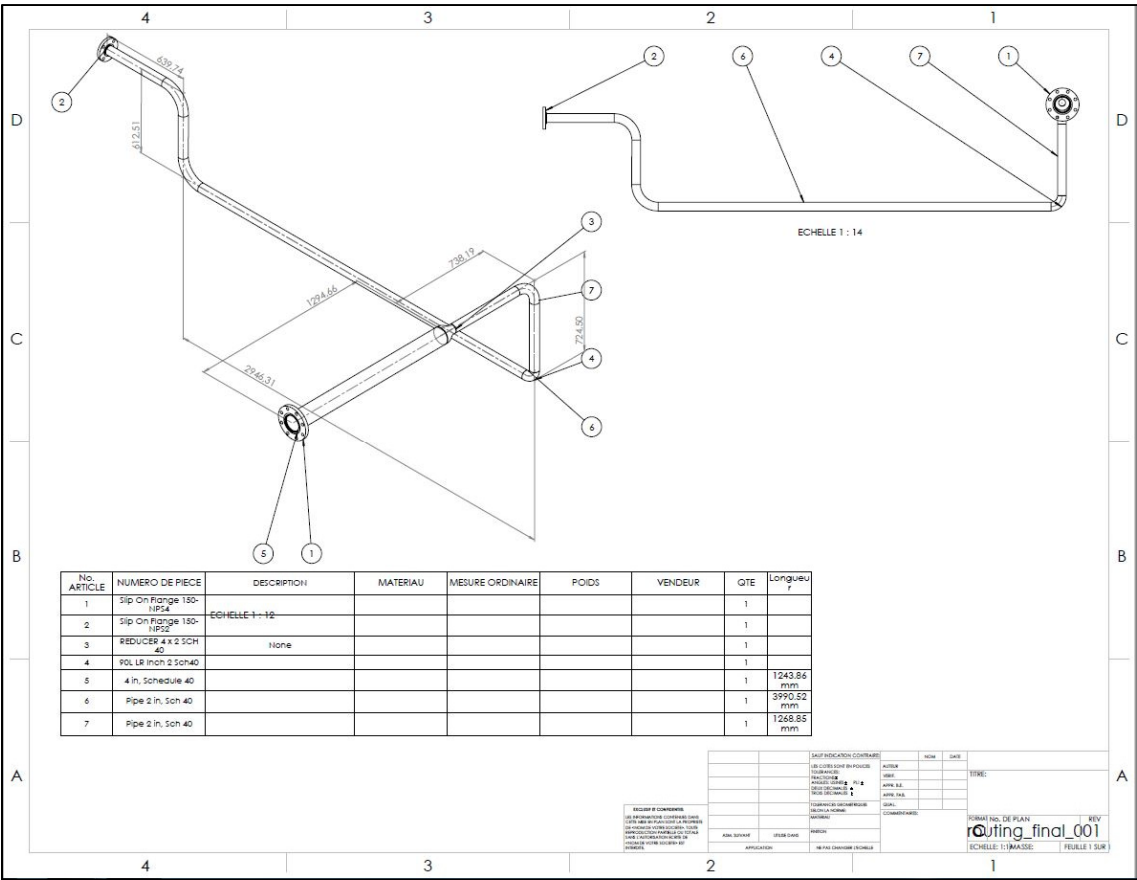


Figure 2.29 Exemple de mise en plan d'une section de tuyaux

Après avoir établi rigoureusement la méthode à suivre pour s’assurer que les systèmes sélectionnés sont performants pour notre projet, nous avons réalisé les expériences. Nous présenterons les résultats et les analyses qui en seront faites dans le prochain chapitre.

Nous pouvons résumer les étapes de ce projet à la Figure 2.30.

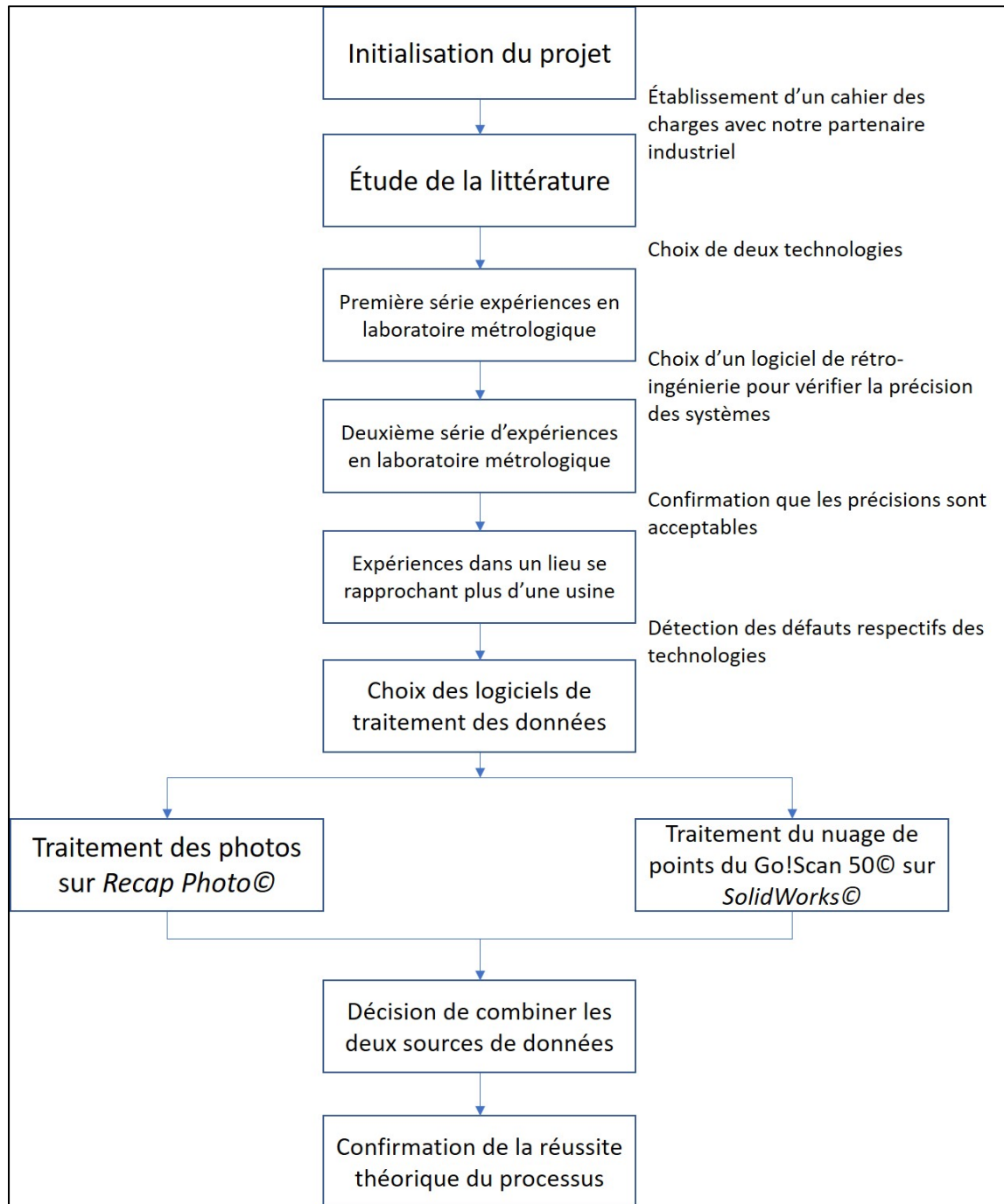


Figure 2.30 Organigramme résumant les étapes du projet

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET ANALYSE

Après avoir présenté notre méthodologie au chapitre 2, nous présentons et analysons les résultats dans le présent chapitre.

3.1 Résultats en laboratoire de métrologie

3.1.1 Valeurs de référence

Pour obtenir les valeurs de référence sur lesquelles nous nous baserons, nous avons réalisé une série de mesures à l'aide d'un pied à coulisse et d'un ruban à mesurer. Nous avons mesuré les diamètres des tuyaux à plusieurs endroits et la longueur de chaque tuyau. Nous avons ensuite fait la moyenne de ces mesures et nous avons considéré cette moyenne comme une valeur de référence sur laquelle nous allons nous baser pour estimer la précision des logiciels de rétro-ingénierie et des systèmes de numérisation utilisés (*voir* Tableau 3.1 et 3.2). Les mesures seront en millimètres.

Tableau 3.1 Définition des « diamètres de référence » [mm]

Échantillon	Valeur mesurée 1	Valeur mesurée 2	Valeur mesurée 3	Valeur moyenne
1	26,6	26,7	26,6	26,6
2	42,1	42,1	42,1	42,1
3	28,9	28,8	28,8	28,8
4	48,0	47,9	47,9	47,9
5	33,5	33,6	33,4	33,5
6	60,1	60,3	62,2	60,9

Tableau 3.2 Définition des « longueurs de référence » [mm]

Échantillon	Valeur mesurée 1	Valeur mesurée 2	Valeur mesurée 3	Valeur moyenne
1	955	944	949	949
2	705	704	704	704
3	1 712	1 707	1702	1 707
4	1 235	1 234	1234	1 234
5	1 092	1 092	1093	1 092
6	1 225	1 232	1229	1 229

3.1.2 Comparaison des logiciels

Afin de comparer les deux logiciels de rétro-ingénierie *VxModel*© et *PolyWorks*©, nous nous sommes concentrés sur les diamètres uniquement. En effet, la longueur du tuyau n'influe pas dans le processus de reconnaissance et d'extraction des cylindres à partir du nuage de points numérisés.

Nous avons donc numérisé l'échantillon de tuyaux plusieurs fois à l'aide du scanneur 3D à lumière structurée. Pour chaque nuage de points, nous avons extrait chaque cylindre correspondant à chaque tuyau à l'aide des deux logiciels. Nous en avons fait des moyennes attitrées à chaque tuyau pour ensuite en calculer l'écart avec les valeurs de référence. L'utilisation de pourcentages permet de plus facilement visualiser la distance qui sépare la valeur ciblée de la valeur obtenue (*voir* Tableau 3.3, construit à partir de Tableau-A I-5 et de Tableau-A I-6).

Tableau 3.3 Comparaison des logiciels de rétro-ingénierie

Tuyaux	Valeur référence	Valeur <i>VxModel</i> © ⁷			Valeur <i>PolyWorks</i> ©		
1	26,6	26,8			26,9		
	<i>Écart</i>	0,1	→	0,5%	0,3	→	1,0%
2	42,1	42,5			42,2		
	<i>Écart</i>	0,4	→	1,0%	0,1	→	0,3%
3	28,8	29,0			28,7		
	<i>Écart</i>	0,1	→	0,4%	-0,1	→	0,4%
4	47,9	48,3			48,2		
	<i>Écart</i>	0,4	→	0,8%	0,3	→	0,5%
5	33,5	33,9			33,8		
	<i>Écart</i>	0,4	→	1,1%	0,3	→	1,0%
6	60,9	60,8			60,7		
	<i>Écart</i>	-0,1	→	0,1%	-0,2	→	0,3%
Moyenne		0,2	→	0,7%	0,1	→	0,6%

Les résultats des deux logiciels sont très semblables. On ne peut donc pas les différencier sur ce critère puisqu'ils donnent tous les deux des résultats acceptables (erreur <1%). On choisira donc le logiciel *PolyWorks*© pour des raisons de prise en main plus simple et d'ergonomie plus agréable. Le logiciel est plus convivial (*User Friendly*).

3.1.3 Précision

Avec logiciel de rétro-ingénierie *PolyWorks*©, on fera une nouvelle série de mesures pour vérifier les diamètres et une autre série pour vérifier les longueurs. On estimera ainsi la précision des systèmes sur deux critères.

⁷ Moyenne de 6 valeurs de diamètre de cylindres extraits

3.1.3.1 L'influence de la lumière sur la précision des mesures

On veut vérifier si la lumière est un facteur influençant les numérisations. On fera donc une série de numérisations dans le laboratoire de métrologie lumière allumée et une autre série de numérisations lumière éteinte. On les appellera « avec lumière » et « sans lumière » (*voir* Tableau 3.4 et Tableau 3.5). Les détails des mesures sont en ANNEXE I (*voir* Tableau-A I-1 et Tableau-A I-3).

Tableau 3.4 Influence de la lumière sur la numérisation des diamètres avec la méthode de lumière structurée (erreurs relatives)

Tuyau	Erreur relative avec lumière ⁸	Erreur relative sans lumière ⁹
1	2,1%	2,0%
2	0,5%	0,4%
3	0,7%	0,3%
4	0,1%	0,2%
5	0,5%	0,7%
6	0,2%	0,4%
Moyenne	0,7%	0,7%

Tableau 3.5 Influence de la lumière sur la numérisation des longueurs avec la méthode de lumière structurée (erreurs relatives)

Tuyau	Erreur relative avec lumière ¹⁰	Erreur relative sans lumière ¹¹
1	0,5%	0,5%
2	1,5%	3,8%
3	2,7%	1,0%
4	1,1%	1,1%
5	0,8%	0,9%
6	1,0%	1,3%
Moyenne	1,3%	1,4%

⁸ Moyenne de 5 numérisations

⁹ Moyenne de 5 numérisations

¹⁰ Moyenne de 5 numérisations

¹¹ Moyenne de 5 numérisations

Les résultats sont semblables, seulement 0.1% d'écart entre les deux méthodes. On pouvait s'y attendre puisque le scanneur 3D à lumière structurée projette sa propre lumière et s'affranchit ainsi de tout problème de luminosité.

On remarque aussi que les résultats sont bons. Ils respectent le cahier des charges. En effet, la précision sur les diamètres est en moyenne à 0,7% près de la valeur de référence. En convertissant ce pourcentage en valeur absolue et en considérant les 3 mm minimum du cahier des charges, on peut estimer le diamètre limite. C'est-à-dire que pour que le relevé soit faux, avec cette précision, il faudrait numériser un tuyau d'au moins 430 mm de diamètre; or à partir de cette grandeur de diamètre, la bibliothèque de tuyaux normalisés que l'on utilisera après permettra de rattraper l'imprécision en trouvant le tuyau de diamètre le plus proche.

Pour la photogrammétrie, les résultats ne sont pas très exploitables si la luminosité n'est pas bonne sur le lieu de numérisation. L'utilisation d'un flash supplémentaire rend les photos difficilement utilisables par le logiciel de traitement à cause des surfaces réfléchives. La photogrammétrie seule a donc du mal à se débarrasser du problème que pose la réflectivité.

3.1.3.2 L'influence du nombre de pixels pour la photogrammétrie

Pour la photogrammétrie, on vérifiera l'importance du nombre de pixels dans le traitement.

On utilisera donc un appareil photo de très haute qualité à 50,0 millions de pixels et un appareil photo de téléphone intelligent à 12,0 millions de pixels (*voir* Tableau 3.6 et Tableau 3.7). On fera l'hypothèse que les mises au point des deux appareils disponibles ont été pré-calibré. La haute qualité de l'appareil photo à 50 MP entraîne aussi un nombre important de réglages à faire pour éviter les problèmes de photos floues ou de mise au point sur un objet en particulier. Certaines valeurs aberrantes dans les mesures sont inhérentes au processus de la photogrammétrie. En effet, l'influence de la lumière, l'angle de prise de vue, le traitement des photos par le logiciel peuvent entraîner des valeurs éloignées (*voir* Figure 3.1). Les détails des mesures sont en ANNEXE I (*voir*

Tableau-A I-2 et Tableau-A I-4).

Tableau 3.6 Résultats sur la précision de numérisation des diamètres obtenus par photogrammétrie

Tuyau	12,0 MP	50,6 MP
1	8,9%	0,4%
2	4,3%	4,4%
3	2,7%	7,1%
4	4,1%	1,4%
5	10,5%	4,8%
6	2,4%	0,5%
Moyenne	5,5%	3,1%

Tableau 3.7 Résultats sur la précision de numérisation des longueurs obtenues par photogrammétrie

Tuyau	12,0 MP	50,6 MP
1	3,1%	0,03%
2	3,1%	1,5%
3	1,9%	0,3%
4	2,3%	0,5%
5	5,9%	0,3%
6	2,3%	0,4%
Moyenne	3,1%	0,5%



Figure 3.1 Rendu 3D obtenu par photogrammétrie montrant les valeurs aberrantes pour les diamètres

Les résultats semblent meilleurs en augmentant le nombre de pixels. L'intuition de départ est donc confirmée. On cherchera donc à avoir le maximum de pixels possibles si l'on souhaite utiliser la méthode de photogrammétrie. De plus, le nombre de photos est aussi un facteur influençant la précision de la numérisation (*voir* Tableau 3.9). Enfin, les résultats respectent le cahier des charges pour le diamètre des tuyaux (il faudrait que le pourcentage soit supérieur à 8.15% pour les diamètres dans le cadre des tuyaux de notre échantillon). Néanmoins, avec notre critère d'erreur acceptée de 3 mm, le diamètre seuil avant de sortir du cahier des charges est réduit à 97 mm.

Le Tableau 3.8 récapitule les résultats des deux systèmes de numérisation tridimensionnelle choisis. On notera que la photogrammétrie nécessite un bon éclairage et la non-utilisation de son flash pour réussir à capter une surface réfléchive. Pour donner une meilleure idée des écarts, les erreurs absolues sont récapitulées dans le Tableau 3.10.

Tableau 3.8 Tableau comparatif des précisions des deux systèmes

	Lumière structurée	Photogrammétrie
Diamètre	0,7%	3,1%
Longueur	1,3%	0,5%

Tableau 3.9 Importance du nombre de photos et de la résolution pour la photogrammétrie

Nombre de photos - résolution	Diamètre
45 photos – 12 MP	8,9%
84 photos – 12 MP	4,3%
100 photos – 50,6 MP	3,1%

Tableau 3.10 Récapitulatif des erreurs absolues des systèmes [mm]

Tuyau	Erreur absolue lumière structurée - diamètre	Erreur absolue photogrammétrie (50,6 MP) - diamètre
1	0,56	0,1
2	0,19	-1,9
3	0,07	-2,0
4	-0,02	-0,7
5	0,12	-1,6
6	-0,12	0,3
Moyenne	0,13	-1,0

3.2 Résultats de l'expérimentation in situ

3.2.1 Go!Scan 50

L'emplacement d'expérimentation dans le stationnement de l'ÉTS a été retenu pour sa ressemblance à la tuyauterie industrielle d'une usine. De plus, elle était accessible depuis le sol, il n'y avait pas obligation de monter sur une échelle ou un échafaudage pour l'atteindre. Dans ce cas, la numérisation aurait été possible, mais plus compliquée. Le cas particulier des numérisations en hauteur grâce à ce système n'a donc pas été pris en compte. La numérisation tridimensionnelle grâce au Go!Scan50© est assez précise pour le cahier des charges, mais comporte quelques inconvénients. Ce scanner portable est tout d'abord relié par un câble. La surface qu'il est possible de numériser est donc limitée par ce câble, à moins de déplacer l'ordinateur portable et d'avoir une rallonge électrique suffisante. De plus, le scanner projette sa lumière sur une surface de numérisation qui est petite. Cela rend plus complexe la numérisation d'une grande surface.

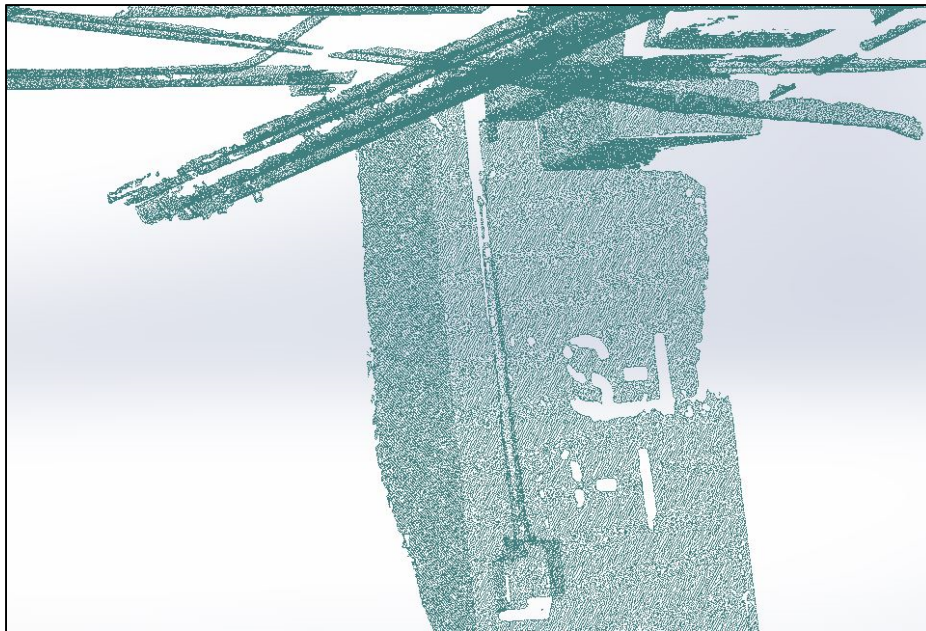


Figure 3.2 Nuage de points relevé par lumière structurée

Pour la numérisation dans le stationnement (*voir* Figure 2.14), nous avons cherché à numériser la tuyauterie, mais aussi des éléments facilement repérables pour le nuage de points. Ici, nous avons numérisé le pilier du stationnement, ses faces planes permettront de facilement orienter le nuage de points (*voir* Figure 3.2).

Cette tuyauterie étant assez simple, il est facile de visualiser l'ensemble en la regardant du dessous. On peut observer sur la partie haute à droite de la Figure 3.3 qu'il y a une légère déviation du tuyau. En effet, aucune cible n'avait été collée sur cette partie du tuyau; elle a été numérisée grâce à l'option « cibles naturelles » du Go!Scan50©. On comprend donc l'importance de bien préparer le site de numérisation et de vérifier le résultat à la fin.

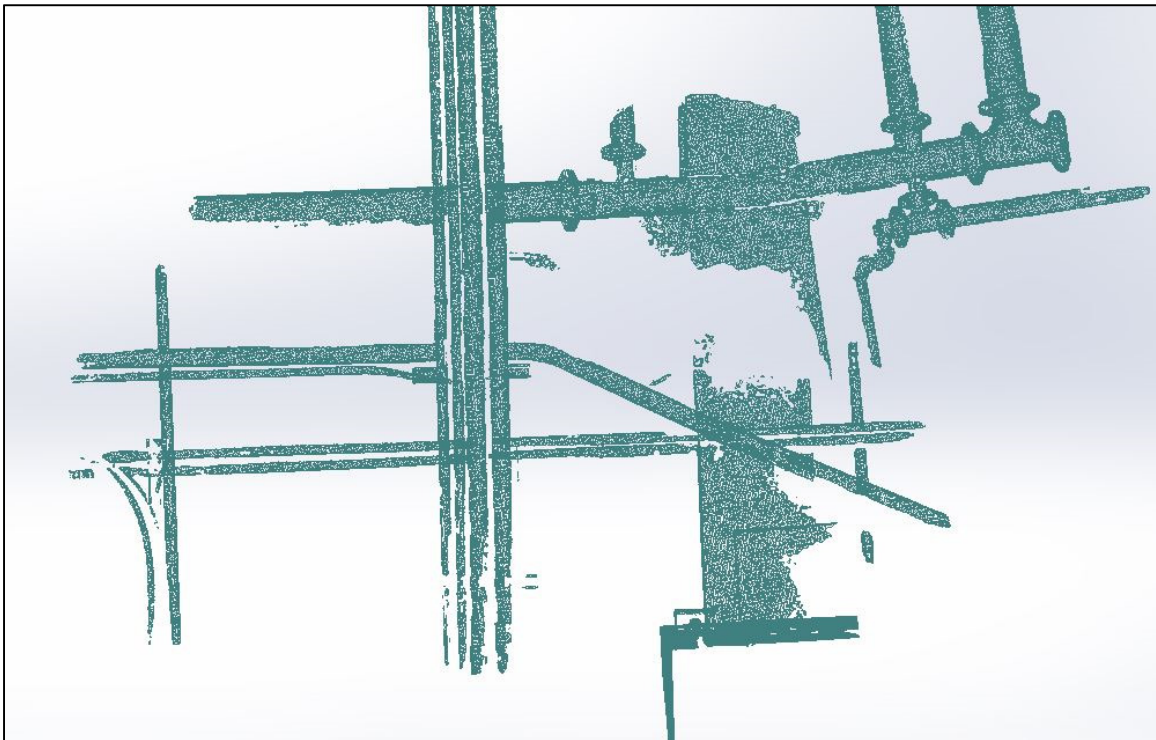


Figure 3.3 Nuage de points relevé par lumière structurée (vue du dessous)

3.2.2 Photogrammétrie

Pour la photogrammétrie, le nombre de points du nuage est plus grand. Toute la scène est captée par les photos selon les différents points de vue. On repère des éléments en commun avec le nuage de points du Go!Scan50© tel que le pilier (voir Figure 3.4).

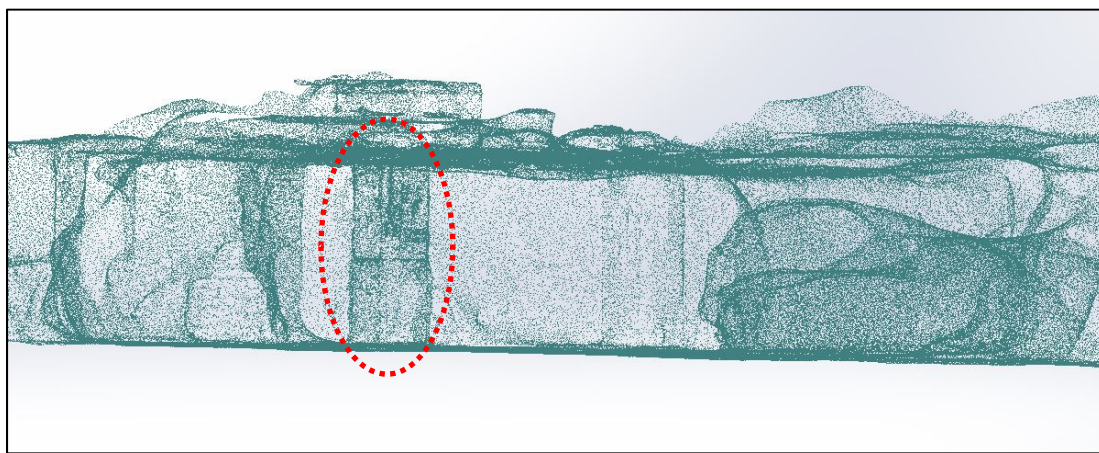


Figure 3.4 Nuage de points relevé par photogrammétrie (vue latérale)

La vue du dessous permet encore une fois d'avoir une vision à plat de la tuyauterie (*voir* Figure 3.5). C'est assez facile ici, car il n'y a pas d'enchevêtrement de tuyaux, ils sont sur le même plan.

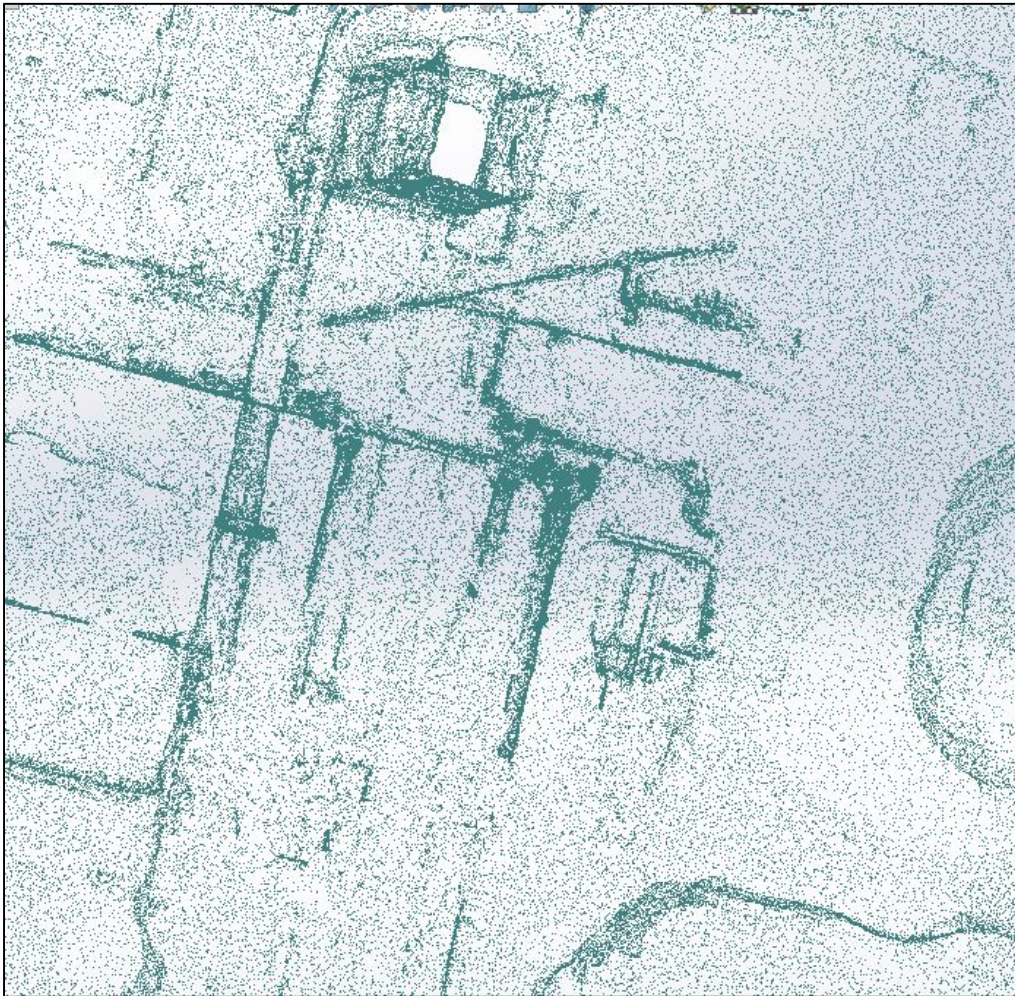


Figure 3.5 Nuage de points relevé par photogrammétrie (vue du dessous)

Sur le logiciel *Autodesk Recap Photo*®, le rendu 3D comporte les textures (voir Figure 3.6 et Figure 3.7). Une texture est une image en deux dimensions que l'on va appliquer sur une surface 2D ou un volume en trois dimensions.¹² Cela donne un rendu très réaliste. Lors du nettoyage de ce rendu, il ne faut pas oublier de mettre une échelle. En effet, le rendu de base n'est pas à l'échelle. Il faut donc penser à prévoir un objet dont la taille est connue qui nous servira de référence. Ici, nous avons utilisé la plaque du pilier que nous avons préalablement mesurée.



Figure 3.6 Aperçu du rendu 3D sous *Autodesk Recap Photo*® (Stationnement 1/2)

¹² [https://fr.wikipedia.org/wiki/Texture_\(image_de_synth%C3%A8se\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Texture_(image_de_synth%C3%A8se))



Figure 3.7 Aperçu du rendu 3D sous *Autodesk Recap Photo*© (Stationnement 2/2)

Le rendu global de la scène est discutable. Nous nous sommes concentrés pour photographier le pilier et la tuyauterie l'entourant. Il est donc normal que tous les éléments environnants ne soient pas très bien captés.

Néanmoins, comme on peut le voir sur la Figure 3.8 et sur la Figure 3.9, ce groupement de 4 tuyaux n'est capté que comme un seul bloc. En effet, la luminosité ambiante assez faible, le peu d'espace entre les tuyaux, la distance entre les tuyaux et l'appareil photo trop faible, provoquent un rendu 3D inutilisable pour la mesure des diamètres et des longueurs.



Figure 3.8 Problème de numérisation : gros bloc de tuyaux

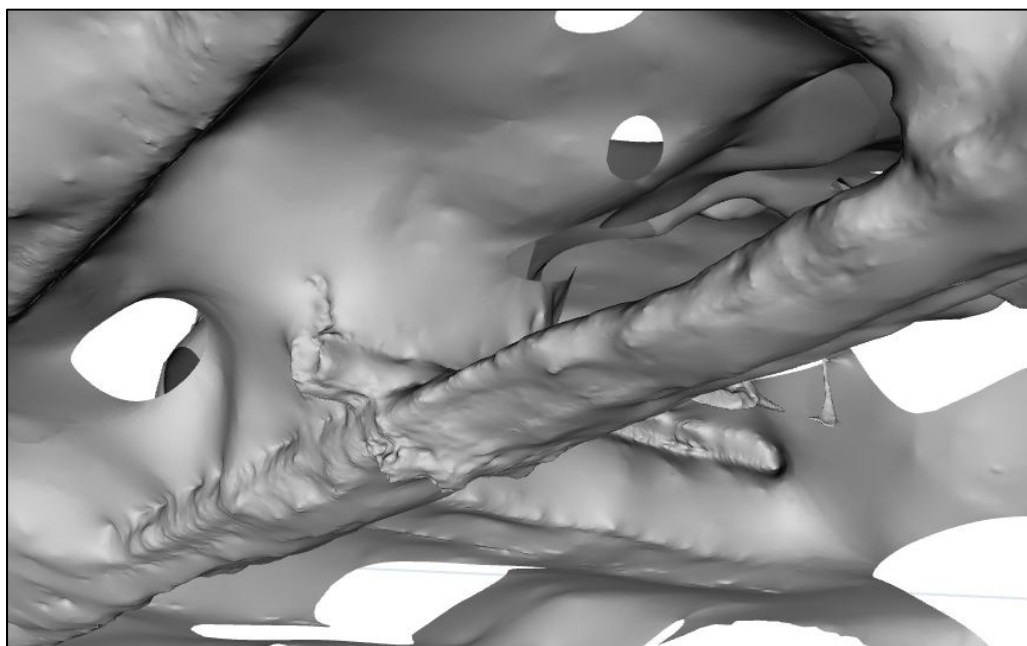


Figure 3.9 Problème de numérisation : gros bloc de tuyaux (rendu 3D sans texture)

Nous avons numérisé un autre emplacement du stationnement pour vérifier que les résultats ne seraient pas faussés par l'emplacement initial choisi. Cet emplacement est mieux éclairé et les tuyaux sont moins proches les uns des autres.

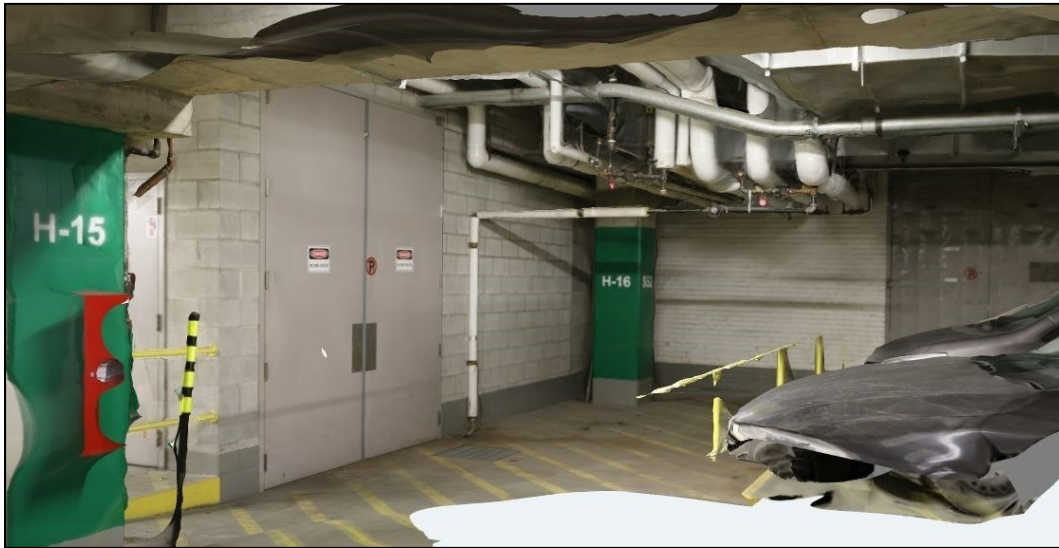


Figure 3.10 Aperçu du rendu 3D sous *Autodesk Recap Photo*© (deuxième stationnement)

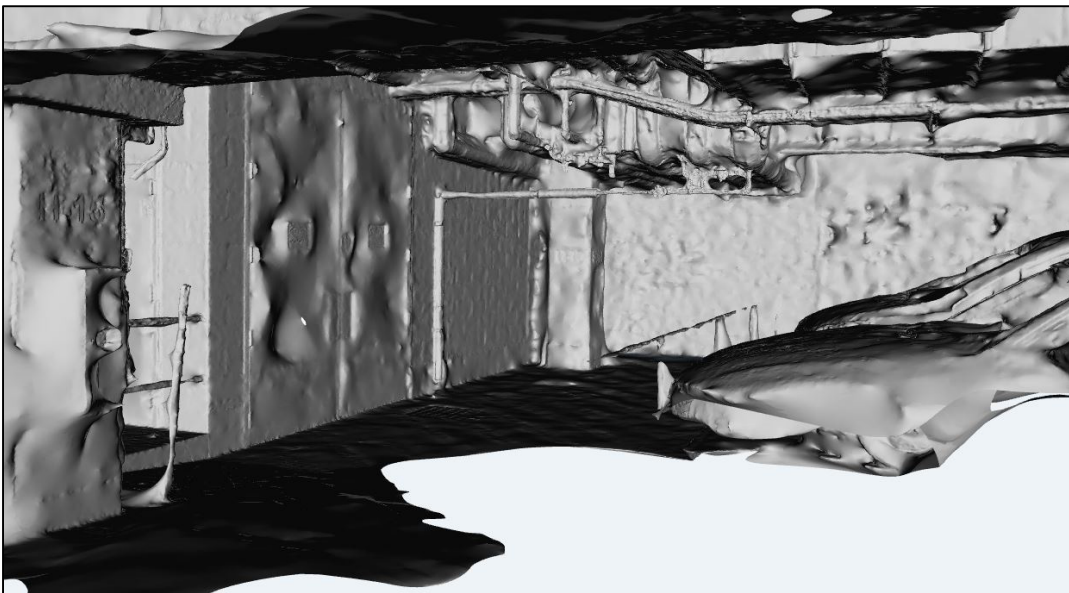


Figure 3.11 Aperçu du rendu 3D sans texture sous *Autodesk Recap Photo*© (deuxième stationnement)

Le rendu de la scène est globalement acceptable, il est réaliste (*voir* Figure 3.10 et Figure 3.11). Mais lorsque l'on se rapproche des tuyaux qui pourraient nous intéresser dans le cas d'une intervention sur la tuyauterie, on remarque les tuyaux sont grossièrement captés (*voir* Figure 3.12 et Figure 3.13).



Figure 3.12 Zoom sur la tuyauterie (deuxième stationnement)

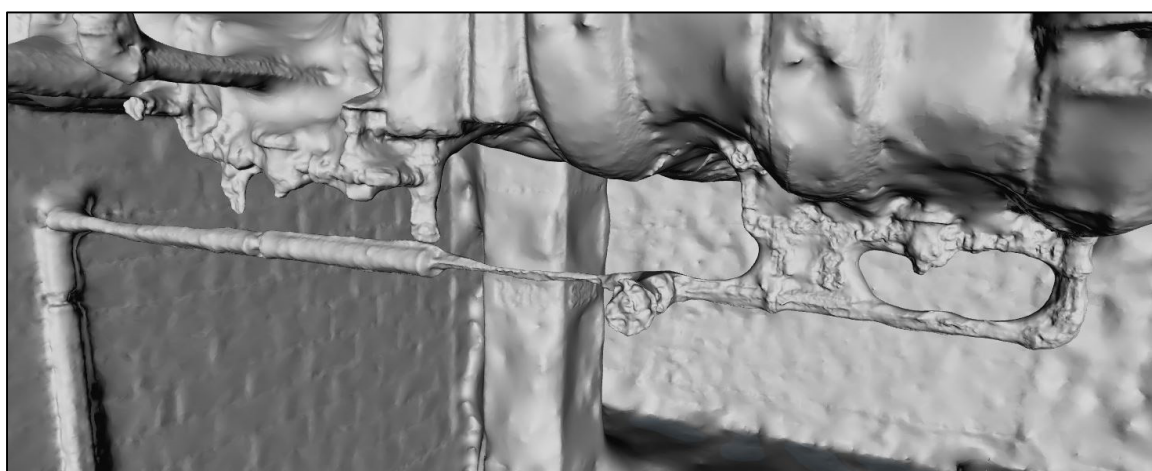


Figure 3.13 Zoom sur la tuyauterie, rendu 3D sans texture (deuxième stationnement)

Une option intéressante du logiciel *Autodesk Recap Photo*© est celle de pouvoir afficher les emplacements où l'on a pris les photos. Cela montre bien que lorsque nous avons capté la scène, nous avons balayé d'emplacement en emplacement toute la scène par une série de photos (voir Figure 3.14).

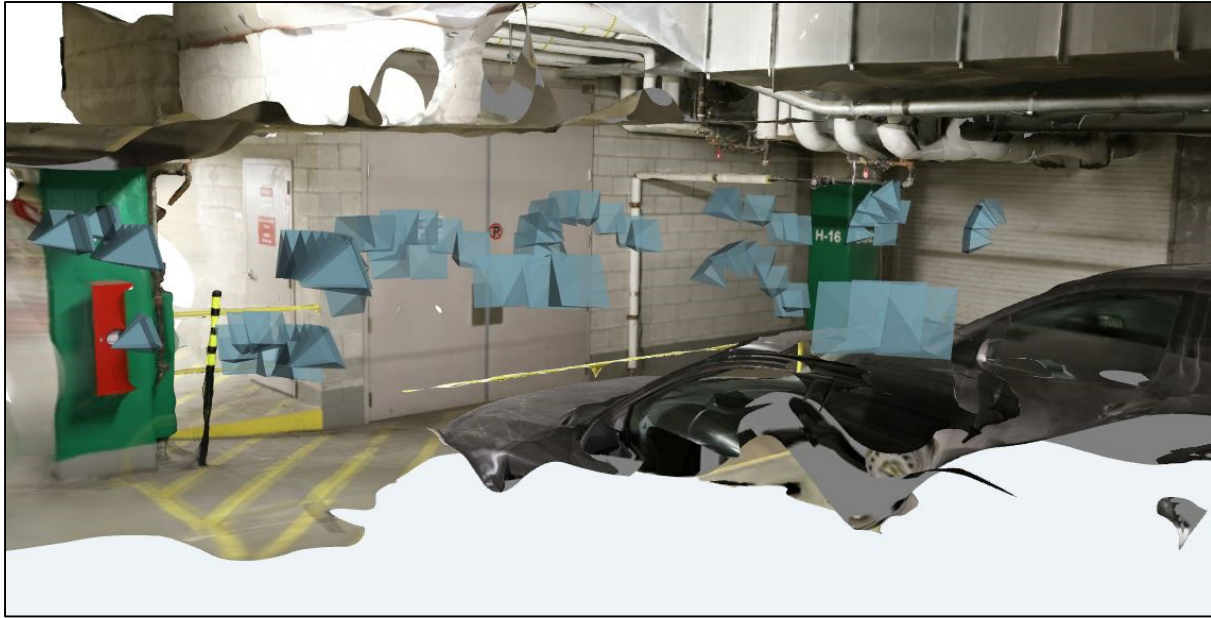


Figure 3.14 Aperçu du rendu 3D, avec représentations des emplacements où les photographies ont été prises sous *Autodesk Recap Photo*© (deuxième stationnement)

3.3 Évaluation temporelle

Nous avons chronométré le temps nécessaire pour la captation lors de plusieurs essais dans le laboratoire et dans le stationnement. Nous connaissons la surface projetée « au plancher »¹³ des deux lieux d'expérimentations et nous pouvons extraire des fichiers de maillage l'aire globale numérisée. Nous allons tout d'abord évaluer le temps nécessaire pour chaque numérisation. Nous pourrions ainsi tracer une courbe de progression de l'utilisation du système et ainsi estimer la facilité de prise en main de chaque système (*voir* Figure 3.15). En effet, l'essai numéro un correspond à la première utilisation du système par l'opérateur. Nous pourrions alors évaluer au fil des essais si la prise en main est rapide, et ceci en comparant les temps. Néanmoins, il faut faire attention à ces temps. En effet, des temps de captation plus longs n'impliquent pas forcément une non-progression, mais peuvent être causés par une surface plus importante balayée (*voir* cercle entourant un point).

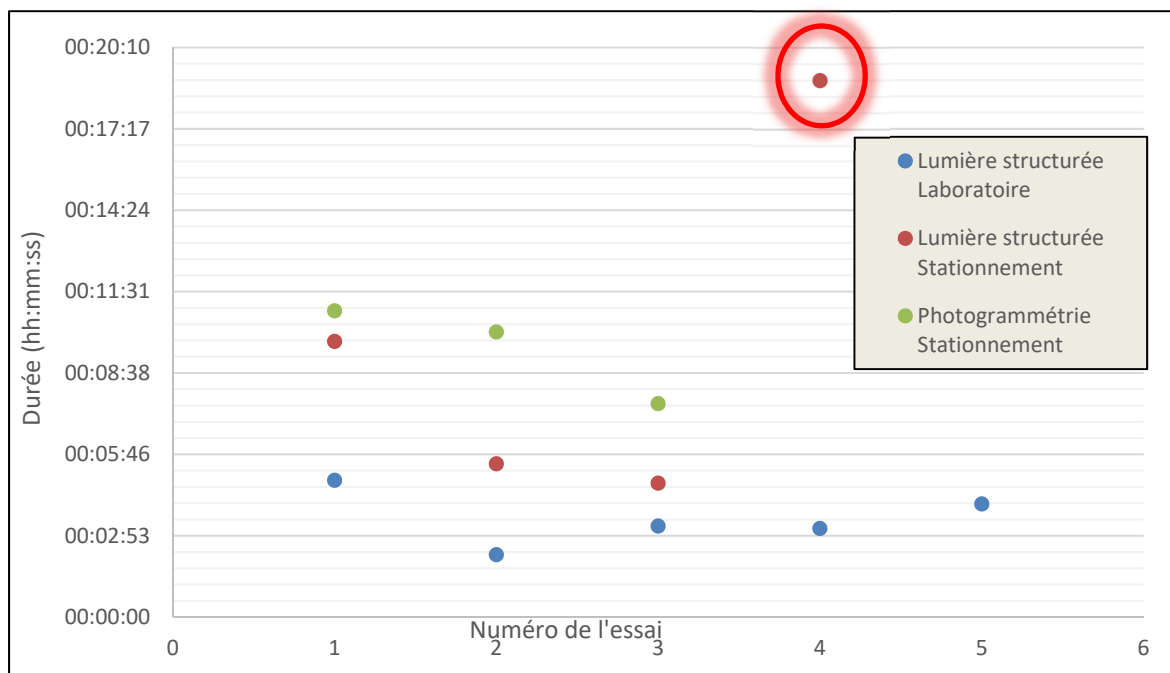


Figure 3.15 Temps de captation pour la lumière structurée et la photogrammétrie

¹³ Zone d'intérêt qu'occupe la tuyauterie projetée au sol

Même si ces temps ne sont qu'indicatifs (par exemple, l'essai numéro 4 de la lumière structurée dans le stationnement est plus long mais a numérisé une aire bien plus grande), on remarque une diminution progressive des temps qui suggère un palier (lumière structurée sur l'échantillon de tuyaux).

Pour pouvoir comparer ces deux technologies qui ne numérisent pas les mêmes grandeurs de surfaces, nous allons utiliser la surface projetée « au plancher ». Nous avons évalué la surface qu'occupe la tuyauterie par projection au sol. Pour l'échantillon de tuyaux dans le laboratoire, il était posé sur un marbre métrologique donc nous l'avons simplement mesuré. Nous utiliserons un ratio (temps / surface au plancher) pour évaluer le temps nécessaire pour capter un mètre carré de notre zone d'intérêt (voir Figure 3.16).

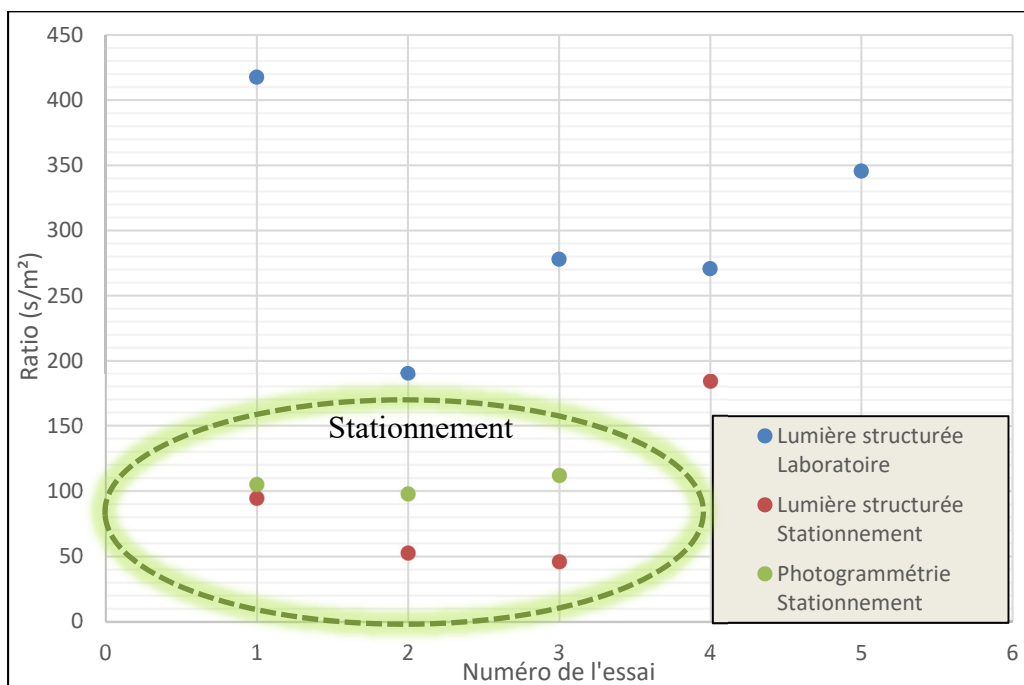


Figure 3.16 Ratio temps / surface au plancher

Néanmoins, si l'on ne prend pas en compte la zone d'intérêt que représente la tuyauterie en elle-même, nos deux technologies sont réellement difficilement comparables. En effet, la photogrammétrie capte tout l'environnement autour, même ce qui n'est pas forcément voulu. L'aire de nos maillages (surface globale captée) sera donc beaucoup plus grande que celle d'une numérisation provenant de la lumière structurée qui cible uniquement notre zone d'intérêt. Pour représenter cette différence, nous utiliserons un coefficient indicateur (surface globale captée / surface au plancher). Nous serons obligés d'utiliser une échelle logarithmique (voir Figure 3.17). La photogrammétrie est bien plus adaptée pour capter une grande surface rapidement.

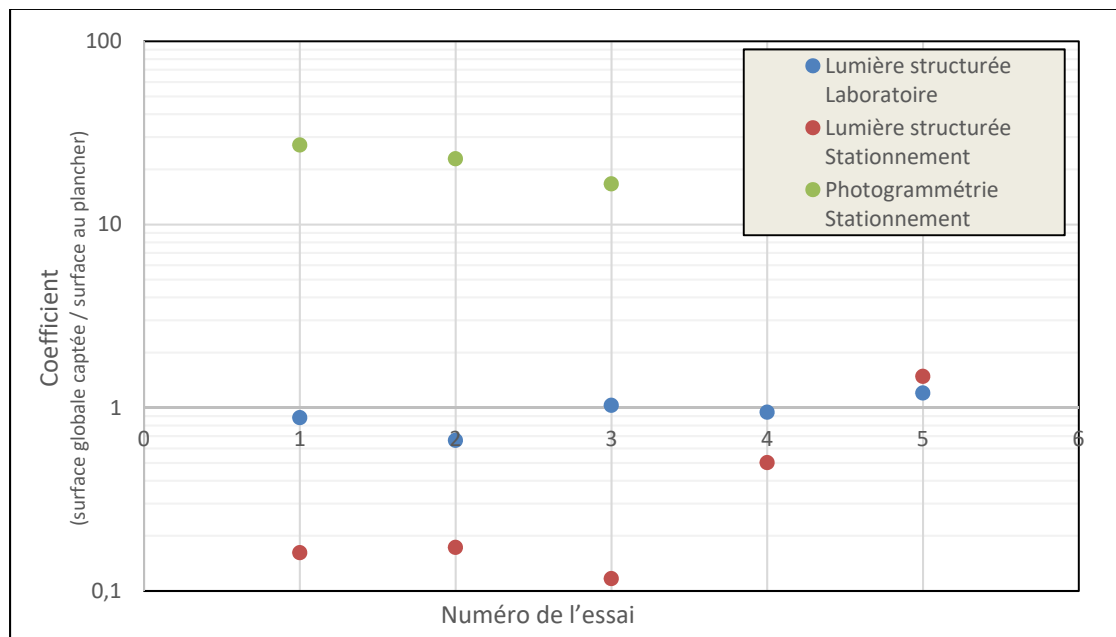


Figure 3.17 Coefficient indicateur d'efficacité (échelle logarithmique)

3.4 Résultats *SolidWorks*©

Après avoir capté le stationnement par deux systèmes différents, nous avons obtenu deux nuages de points. Celui obtenu par photogrammétrie est difficilement utilisable sur *SolidWorks*© à cause de son nombre de points trop important. En effet, les fichiers sont de l'ordre de plusieurs millions de points pour une surface ciblée au plancher de 6,2 m². On ne pourra pas le traiter à l'aide du module *ScanTo3D*. Celui obtenu par lumière structurée sera donc importé sur *SolidWorks*© comme décrit dans la partie 2.5. Une fois le maillage réalisé, nous pouvons reconnaître des formes géométriques simples. Ici, nous avons extrait des plans (en orange sur la Figure 3.18) et des cylindres (en bleu sur la Figure 3.18). Nous avons ensuite rendu coaxiaux les tuyaux normalisés (en violet sur la Figure 3.18) qui correspondaient à ces cylindres.

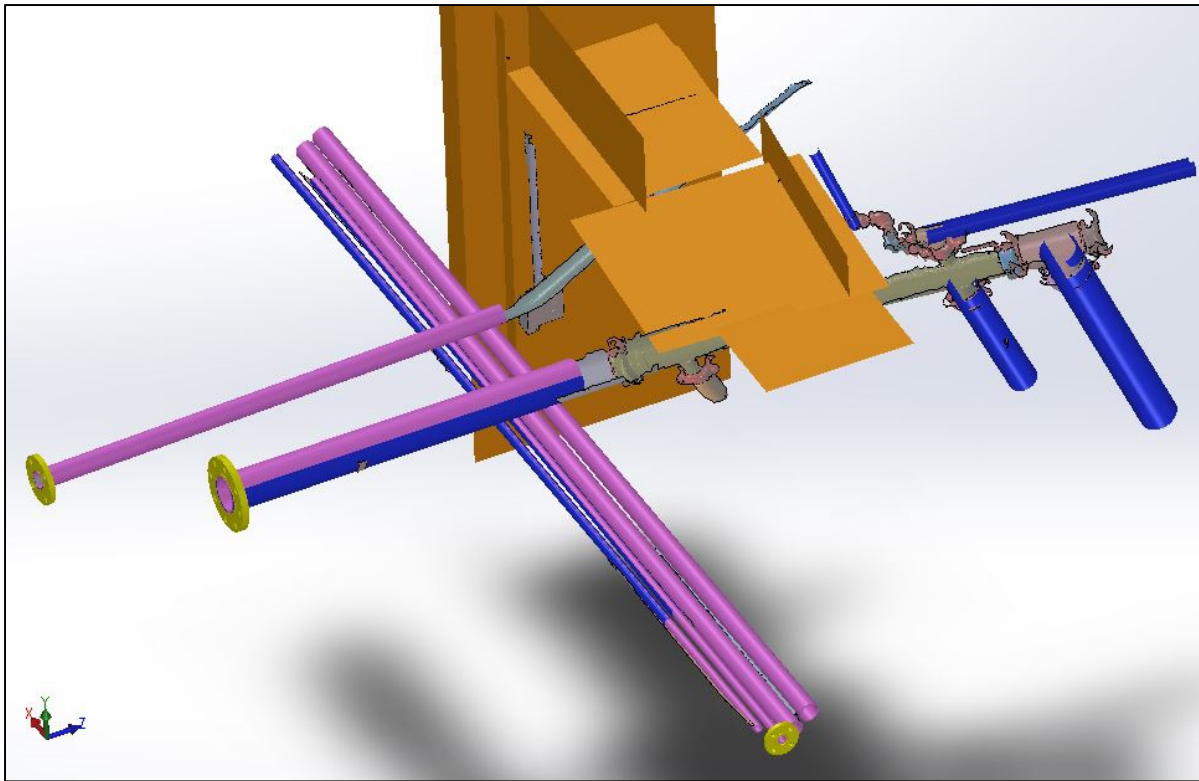


Figure 3.18 Reconnaissance de géométries simples (seulement à partir des données provenant de la lumière structurée)

Après avoir préparé la tuyauterie de base que nous avons numérisée, nous avons pu réaliser des ajouts et modifications que TUYO® pourrait réaliser. Nous avons donc rajouté des réservoirs, des pompes, des brides ou encore des changements de diamètre de tuyau (voir Figure 3.19). Tout ce travail peut être ensuite mis en plan. Chaque sous-section de la tuyauterie peut être envoyée au découpage (voir Figure 2.29). On peut aussi mettre en plan toute la scène. Cela aidera à avoir une meilleure compréhension globale de la tuyauterie et du travail à faire (voir Figure 3.20).

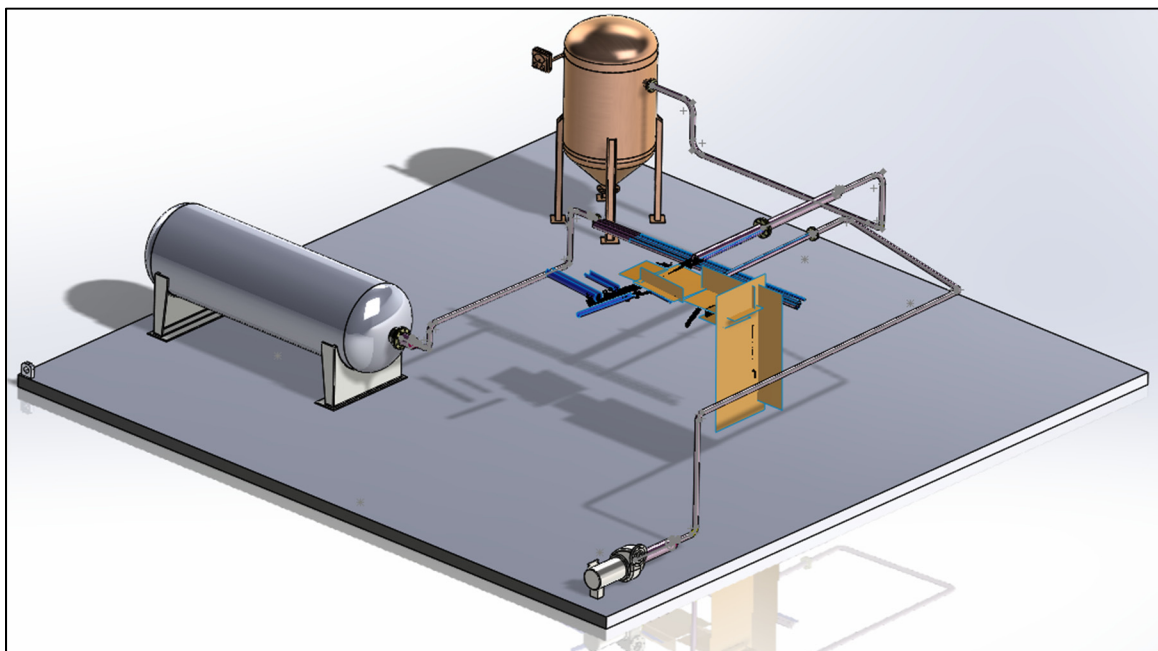


Figure 3.19 Conception assistée par ordinateur possible à partir du nuage de points (lumière structurée uniquement)

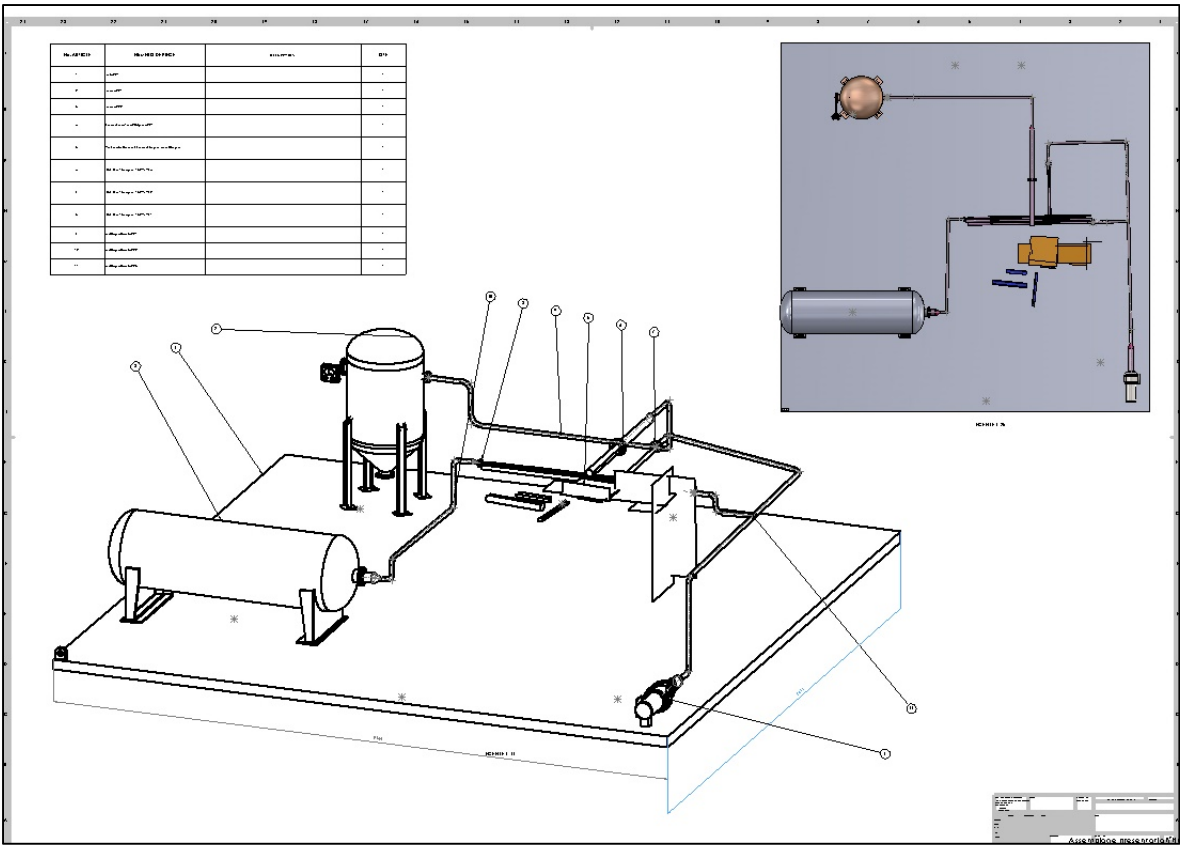


Figure 3.20 Mise en plan de l'assemblage réalisé à partir du nuage de points de la lumière structurée

Néanmoins, cette méthode est incomplète, car elle ne prend pas en compte l'encombrement de la pièce. En effet, nous n'avons numérisé que la tuyauterie ciblée, l'environnement immédiat n'est donc pas pris en compte. Lorsque nous avons réalisé cet exemple de tuyauterie, nous avons eu une totale liberté dans les directions et dans le choix des emplacements des objets. Or, dans la réalité il y a des obstacles, des machines, d'autres tuyaux ou encore divers objets qui peuvent encombrer le chemin. Il faut donc pouvoir prendre en compte cet encombrement. Sur la Figure 3.21, nous avons superposé le nuage de points obtenu par photogrammétrie avec l'exemple de tuyauterie réalisé à partir du nuage de points obtenu par lumière structurée. En effet, nous pouvons importer ce volumineux nuage de points et le superposer tel quel sans le traiter avec *ScanTo3D* au préalable. Le nuage de points provenant de la méthode photogrammétrique apporte alors l'information de l'encombrement. Par ailleurs, nous remarquons que dans notre exemple, il y a de multiples collisions. C'est pourquoi nous présenterons dans le chapitre suivant une méthode combinant les deux systèmes. Cette combinaison permet de pallier les défauts de chacun et de garder les avantages de deux systèmes.

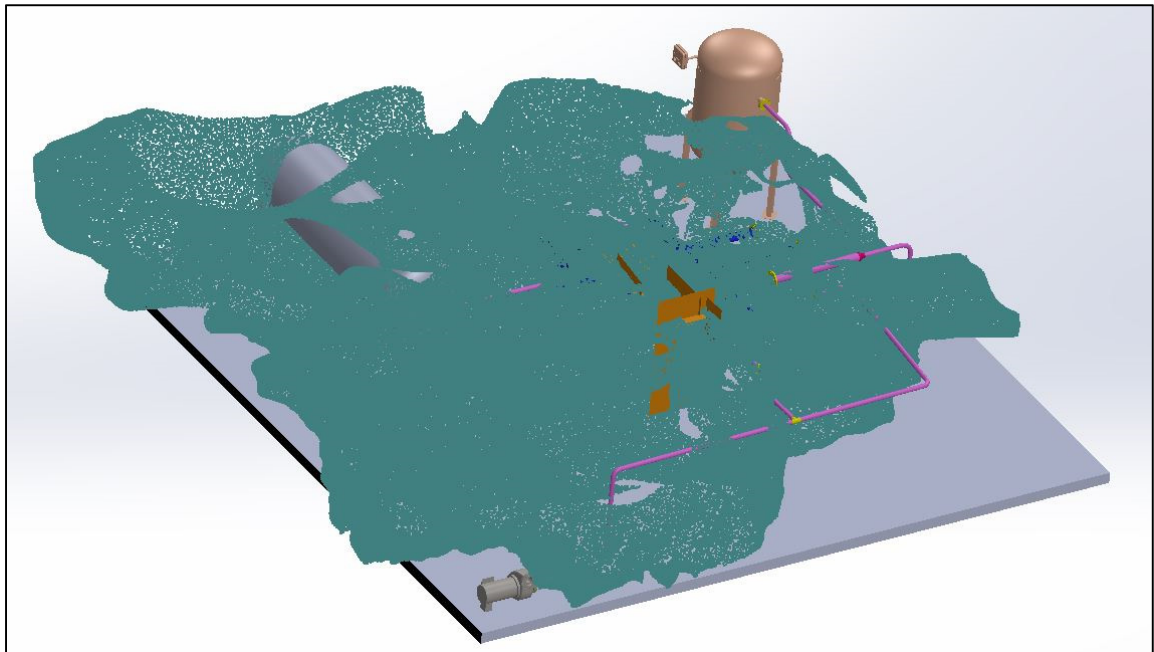


Figure 3.21 Superposition du nuage de points de la photogrammétrie avec l'exemple de tuyauterie réalisé

CHAPITRE 4

SOLUTION PROPOSÉE

L'utilisation séparée de chaque système permet d'obtenir des résultats qui ne satisfont pas entièrement le cahier des charges. En effet, le scanneur 3D à lumière structurée permet d'obtenir un relevé précis sur une zone ciblée réduite alors que la photogrammétrie permet d'obtenir une large zone captée, mais avec une précision dépendant grandement de facteurs extérieurs.

4.1 Superposition des données des deux systèmes

Nous avons donc décidé de combiner les deux systèmes : le scanneur 3D à lumière structurée et la photogrammétrie. Pour cela, nous commençons tout d'abord par importer le nuage de points obtenu par lumière structurée comme décrit dans la partie 2.5. Ensuite, nous importons celui obtenu par photogrammétrie. Dans un premier temps, le nuage de points obtenu par photogrammétrie et le maillage obtenu par lumière structurée ne sont pas superposés (voir Figure 4.1).

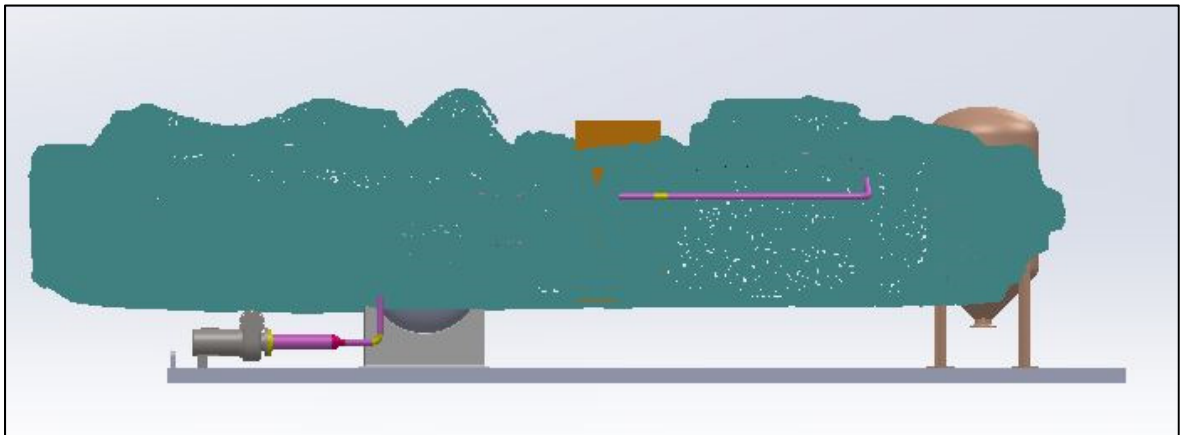


Figure 4.1 Importation du nuage de points provenant de la photogrammétrie sur la conception de la tuyauterie

Nous allons donc les superposer manuellement. Il faut pour cela avoir un élément de référence commun aux deux numérisations. Dans notre cas, nous utiliserons le pilier pour pouvoir orienter correctement le nuage de points selon deux axes (x et y) et la tuyauterie pour le dernier axe (z). Pour cela, nous utiliserons des déplacements et des rotations selon ces axes (voir Figure 4.2 et Figure 4.3). Le procédé est encore manuel mais ne prend pas beaucoup de temps, environ 5 minutes. Les erreurs de reproductibilité et de répétabilité n'ont pas été prises en compte.

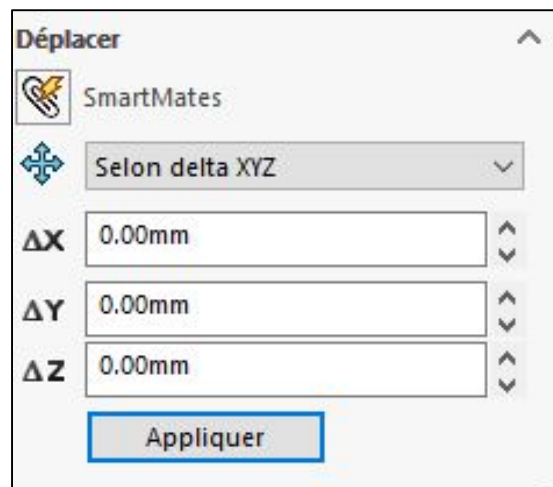


Figure 4.2 Translation manuelle
selon les axes x, y et z

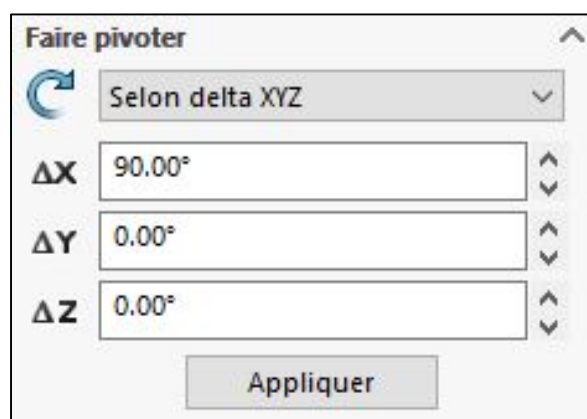


Figure 4.3 Rotation manuelle selon
les axes x, y et z

Les plans que nous avons extraits par rétro-ingénierie lors du maillage du nuage de points de la lumière structurée servent de repère pour pouvoir caler efficacement le nuage de points de la photogrammétrie (*voir* Figure 4.4).

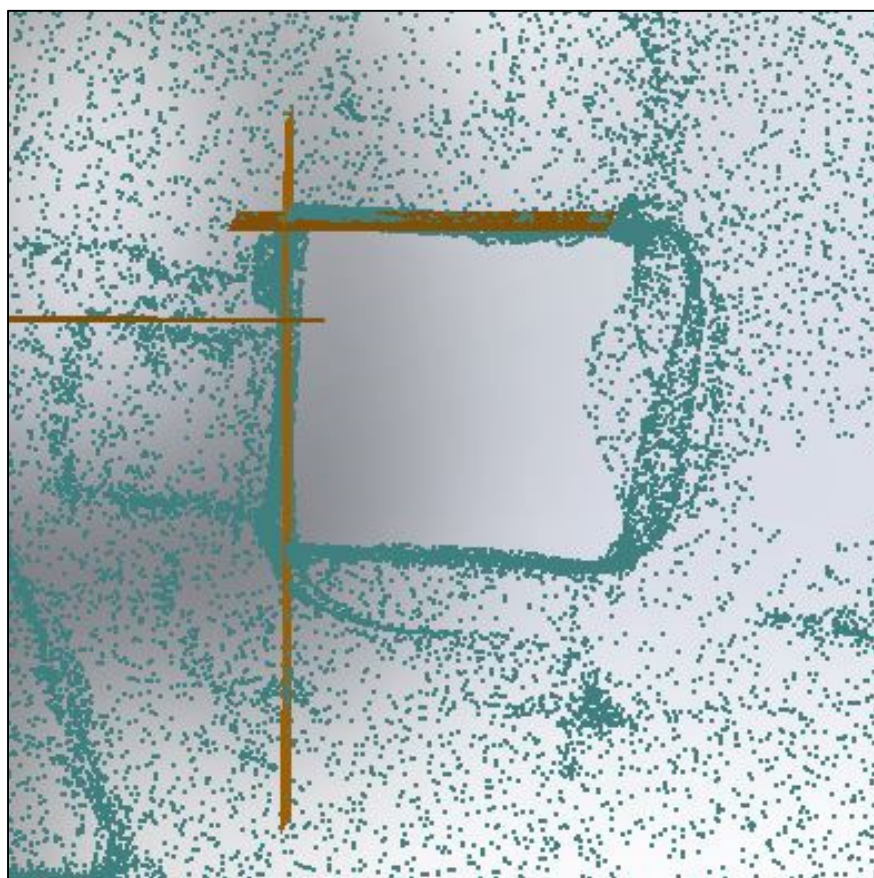


Figure 4.4 Calage du nuage de points de la photogrammétrie sur un élément de référence

4.2 Exemple de réalisations possibles

Maintenant que nous disposons de la visualisation des obstacles environnant la tuyauterie sur laquelle nous voulons travailler, nous pouvons réaliser quelques exemples montrant les possibilités qu'offre le module de routage de *SolidWorks*®. Nous avons placé une pompe sur le plancher, qui est ici à la bonne distance de la tuyauterie cette fois-ci. Nous pouvons relier notre tuyauterie existante à cette pompe que l'on pourrait mettre en place (voir Figure 4.5).

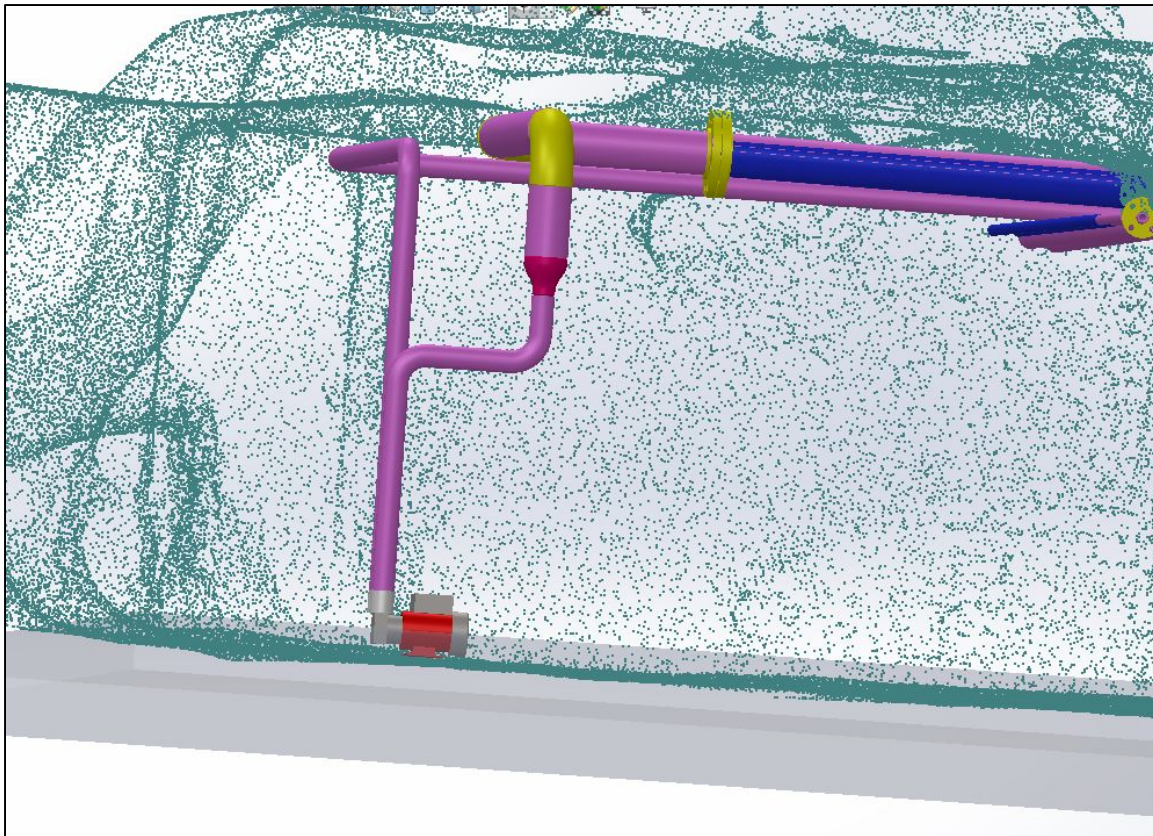


Figure 4.5 Création d'une tuyauterie s'insérant dans l'environnement, sans collision

Grâce à cette superposition, nous comprenons que nous n'avons pas l'espace pour utiliser les différents réservoirs du précédent exemple (*voir* la Figure 3.19), car ils sont tous trop hauts excepté un. Le seul utilisable ne peut être placé qu'à un seul endroit sans rentrer en collision avec l'environnement. Or, à cet endroit il rentre en collision avec la tuyauterie existante et celle que nous avons réalisée (*voir* Figure 4.6). C'est la superposition des deux données provenant des deux sources qui a rendu cette détection rapide.

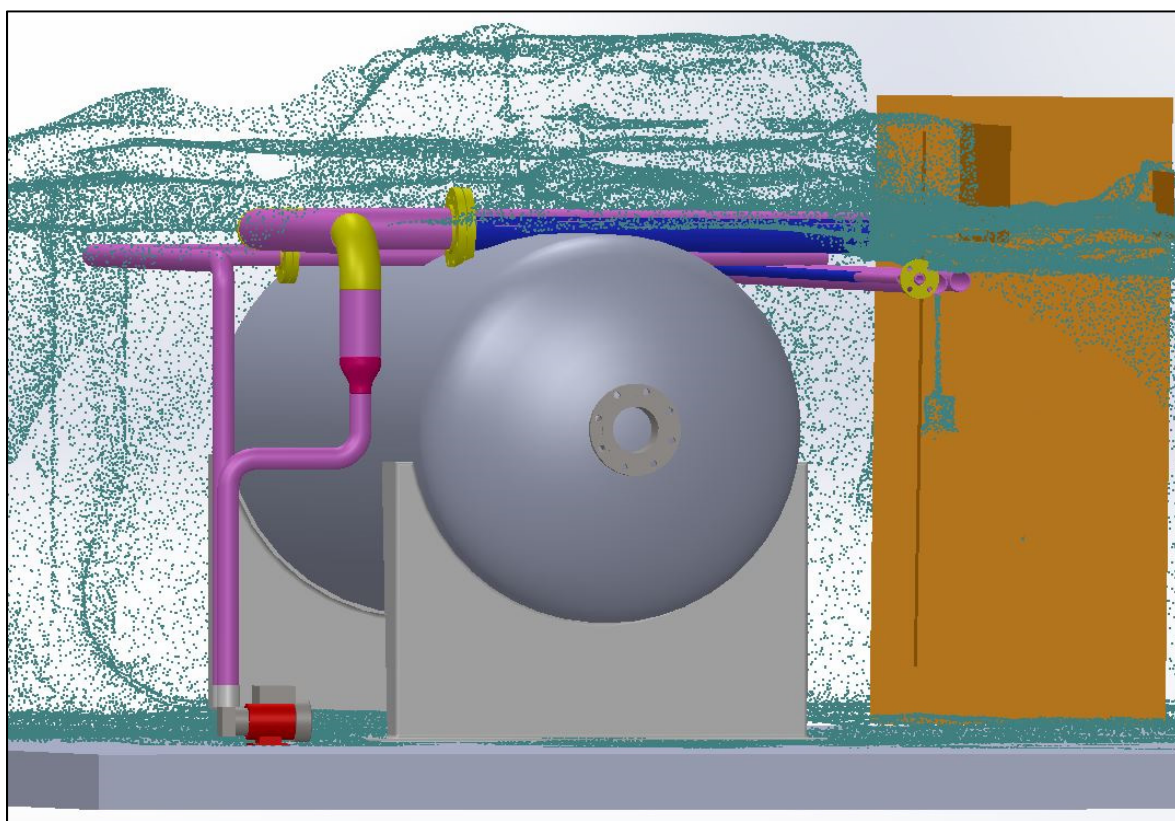


Figure 4.6 Détection facile des collisions grâce à la superposition du nuage de points de la photogrammétrie et du maillage de la lumière structurée

Comme précédemment, nous pouvons réaliser des mises en plan très pratique pour la compréhension globale de l'environnement, des directions de la tuyauterie et des distances (voir Figure 4.7). De plus, une mise en plan des sous-sections de la tuyauterie réalisée est toujours possible (voir Figure 4.8).

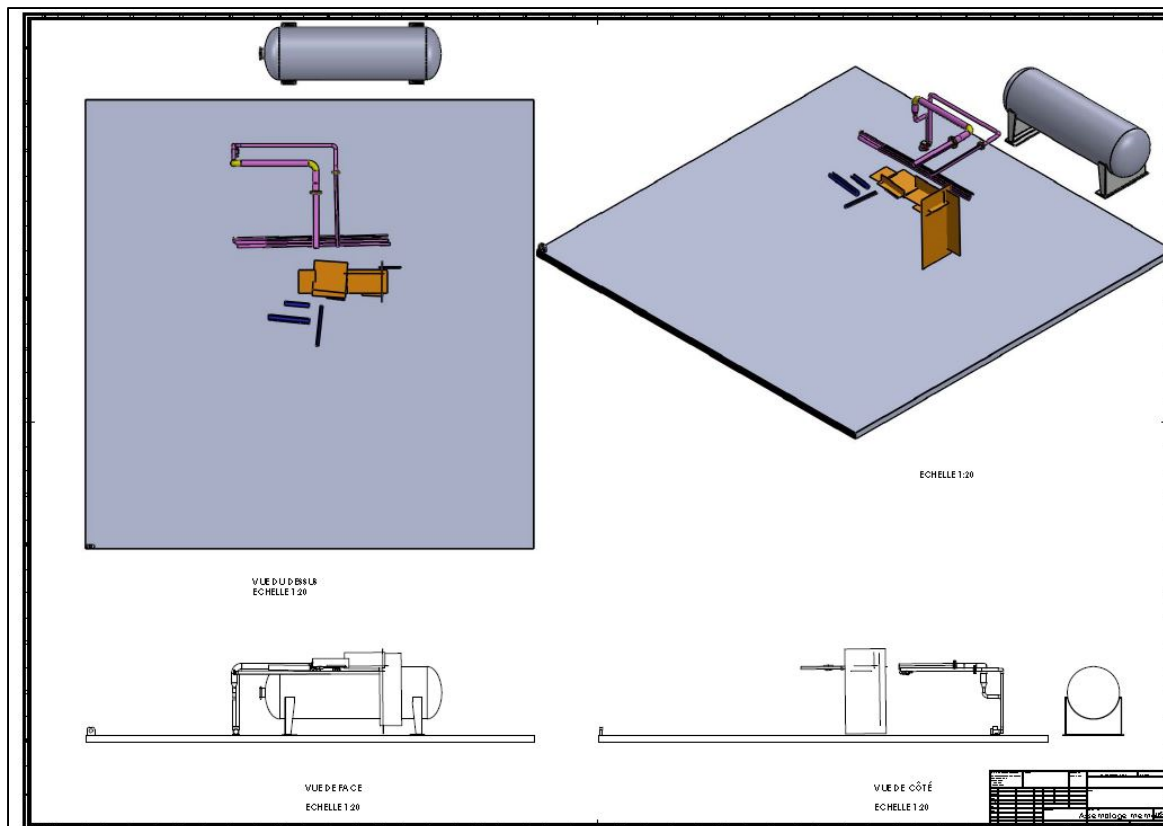


Figure 4.7 Mise en plan globale permettant une bonne compréhension du projet

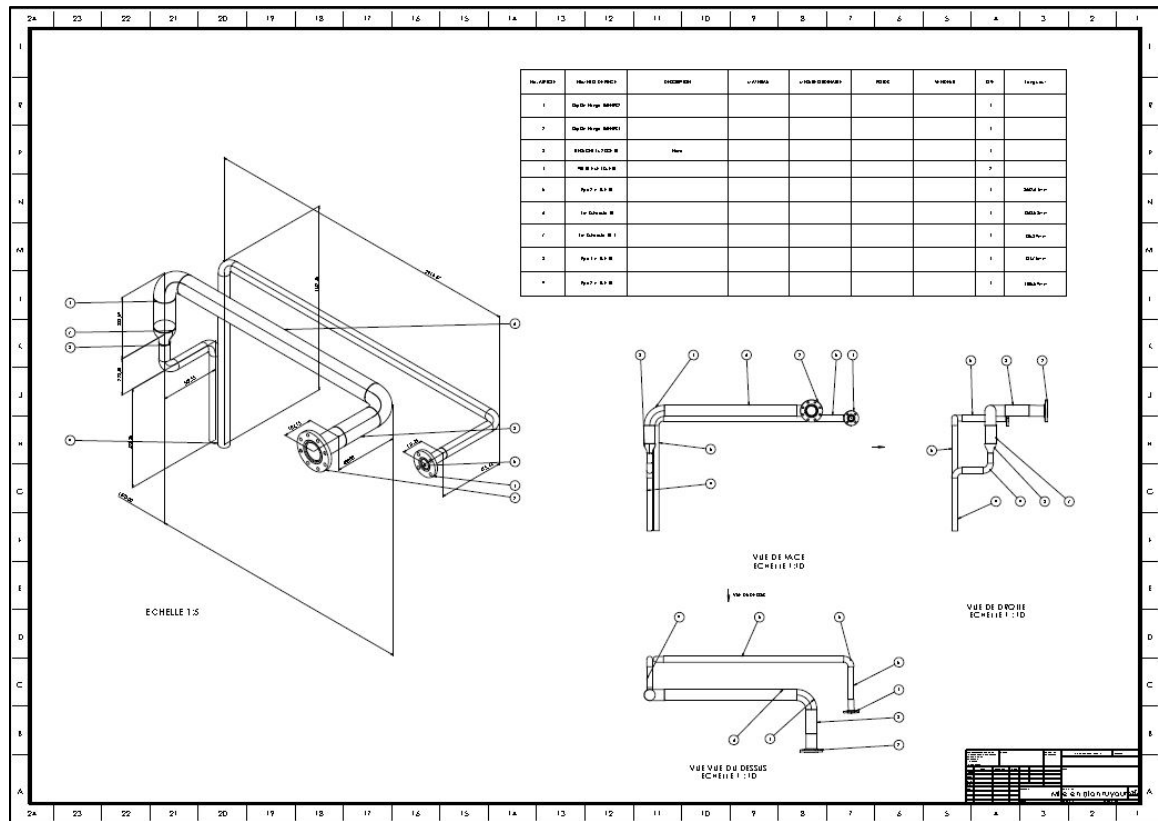


Figure 4.8 Mise en plan spécifique d'une sous-section de la tuyauterie à réaliser

De plus, cette solution combinant la captation par lumière structurée et la photogrammétrie est intéressante puisqu'elle permet de surpasser la faible portée de la méthode de lumière structurée (voir Figure 4.9). En effet, cette technologie ne permet pas de numériser des grands volumes comme souhaité. En revanche, nous pouvons toujours numériser à plusieurs endroits avec le scanneur 3D à lumière structurée pour ensuite fusionner toutes les numérisations sur l'assemblage global de travail. Le niveau d'incertitude engendré par ces fusions n'a pas été évalué et pourrait faire l'objet d'études complémentaires.

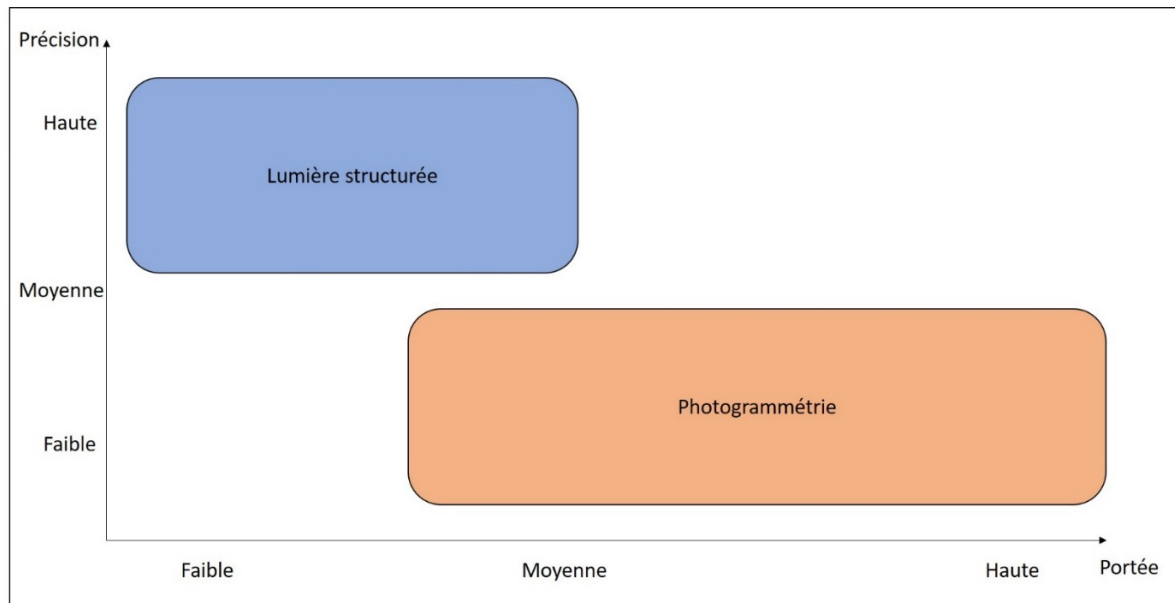


Figure 4.9 Comparaison des ordres de grandeur de portée et de précision des deux systèmes

4.3 Estimation du coût de la solution

Pour vérifier si cette solution satisfait le critère financier du cahier des charges, nous allons faire une estimation des coûts. Il y a trois investissements à faire :

- Le système de scanner 3D à lumière structurée coûte environ 28 000 \$CAD (devis Créaform®);
- Le système de photogrammétrie comporte un appareil photographique à environ 8 000 \$CAD et le logiciel *Autodesk Recap Pro*® qui fonctionne grâce à un abonnement de 400 \$CAD / an. De plus, une formation pour les employés est envisageable ;
- Et enfin, le logiciel *SolidWorks Premium*® dont le prix est d'environ 10 000 \$CAD.

Nous obtenons pour cette solution de combinaison un prix d'environ 46 400 \$CAD. Il s'agit là d'une estimation. En effet, lors des achats les prix peuvent être négociés selon les quantités achetées ou pour l'abonnement selon la durée choisie. Cette solution satisfait donc le critère financier du cahier des charges du projet qui consistait à ne pas dépasser 50 000 \$CAD.

Le Tableau 4.1 est un récapitulatif de chaque solution indépendante et de la solution de combinant les deux systèmes. Il récapitule les prix, les précisions, les portées, et d'autres caractéristiques.

Tableau 4.1 Tableau comparatif des solutions

Systèmes	Lumière structurée	Photogrammétrie	Combinaison Lumière structurée + Photogrammétrie
Prix d'investissement ¹⁴	38 000 \$CAD	18 400 \$CAD	46 400 \$CAD
« Précision diamètre » en laboratoire	0,7%	3,1%	0,7%
« Précision longueur » en laboratoire	1,35%	0,5%	0,5%
Prise en compte de l'encombrement	Non	Oui	Oui
Influence de la lumière	Faible	Importante	Faible ¹⁵
Portée	Faible	Grande	Grande
Besoin de cibles	Oui	Conseillé	Oui
L'espace entre les tuyaux peut être	Faible	Grand seulement	Faible ¹⁶
Temps d'installation	Moyen	Faible	Moyen
Temps de traitement	Faible	Moyen	Moyen

¹⁴ Matériel + logiciels

¹⁵ Faible puisque les zones nécessitant une bonne précision seront captées par le scanneur 3D à lumière structurée

¹⁶ Faible puisque les zones nécessitant une bonne précision seront captées par le scanneur 3D à lumière structurée

Voici une fiche « processus » que notre partenaire industriel pourrait utiliser pour se guider lors des opérations de numérisations et de traitement (voir Figure 4.10). Nous pouvons la détailler sur les opérations 1 (voir Figure 4.11) et 2 (voir Figure 4.12). Cette fiche se veut simple et concise afin d’être un mémo.

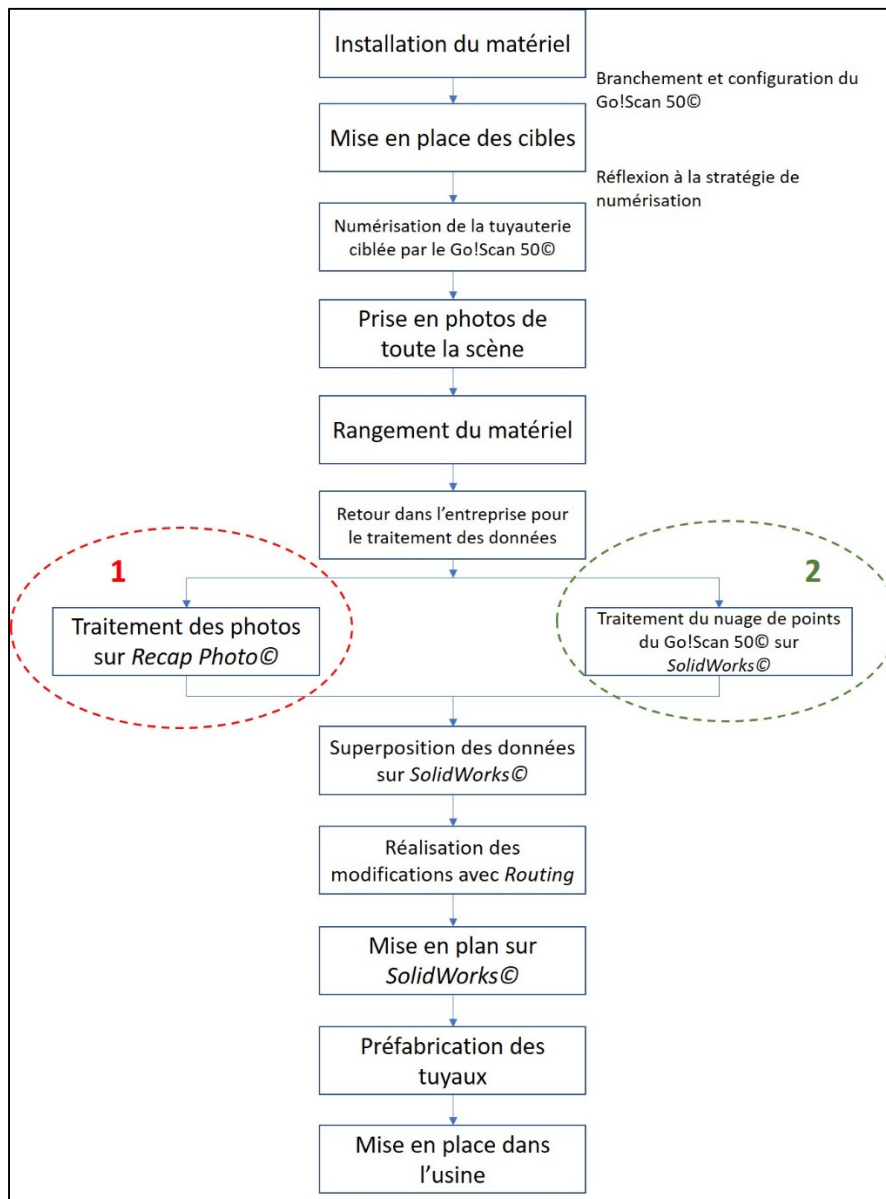


Figure 4.10. Fiche mémo du processus de numérisation et de traitement des données

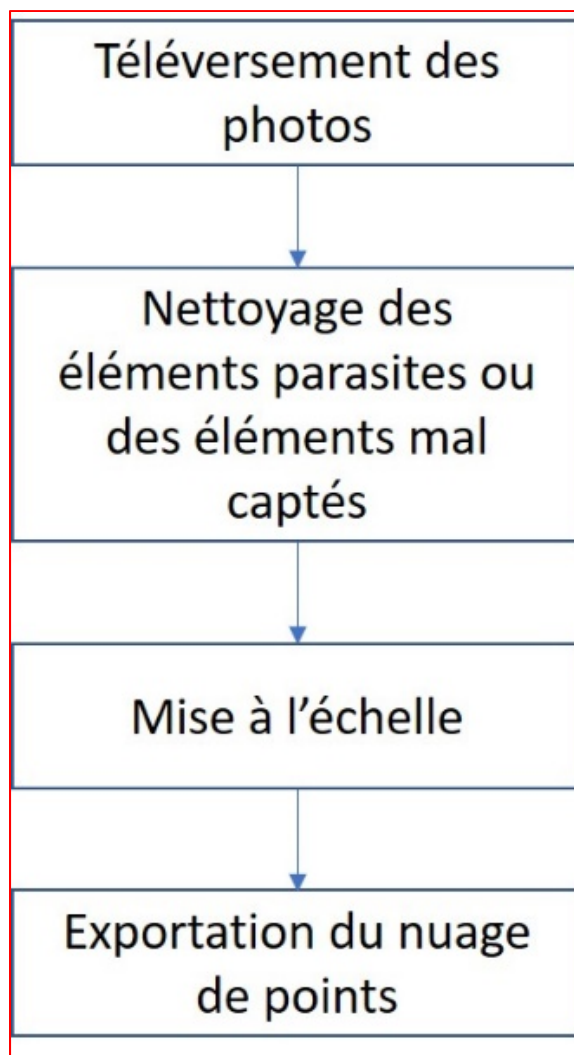


Figure 4.11 Fiche mémo du processus de traitement des données photogrammétriques, « opération 1 »

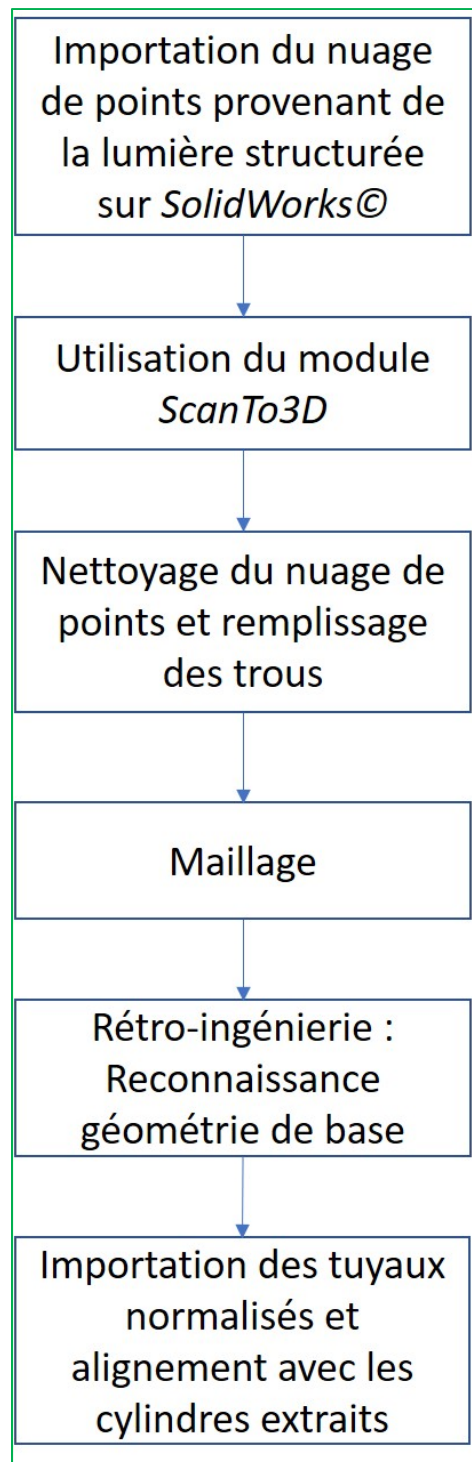


Figure 4.12 Fiche mémo du processus de traitement des données de la lumière structurée, « opération 2 »

CONCLUSION

L'intervention sur une tuyauterie industrielle, dont les tuyaux sont très réfléchissants, est un processus qui demeure encore entièrement manuel. Cependant, la prise de mesures manuelles peut être remplacée par un processus de numérisation tridimensionnelle. Trois raisons principales amènent à envisager un remplacement de cette méthode manuelle. Tout d'abord, elle est chronophage, ensuite l'opérateur est une source d'erreurs connue, et enfin la précision obtenue est peu satisfaisante. L'essor des technologies de numérisation tridimensionnelle et de la métrologie à grande échelle rend intéressante la perspective d'utiliser un processus numérique. Nous avons exploré la littérature du domaine, ce qui nous a permis de faire un tri parmi les technologies capables de numériser des surfaces réfléchissantes en restant sur une faible plage de prix ($\approx 50\,000$ \$CAD). Notre choix s'est porté sur deux systèmes : un scanneur 3D à lumière structurée portable jumelé avec un système de photogrammétrie.

Après une série d'expérimentations et de confirmations métrologiques des performances en laboratoire, nous avons convenu que chaque système n'était pas, indépendamment, capable de répondre à la totalité du cahier des charges. Ces expérimentations se sont tout d'abord déroulées en laboratoire avec un environnement entièrement contrôlé, puis dans un environnement similaire aux cas industriels (stationnement souterrain de l'ÉTS). Nous avons alors décidé de combiner les deux systèmes. En fusionnant les deux fichiers de données obtenus après les captations, nous avons pu obtenir un résultat global répondant au cahier des charges. Cette solution combine deux systèmes. Elle en prend les avantages de chacun en surmontant les défauts de l'autre système. C'est une meilleure solution que celle de chercher un système unique qui répondrait à tous les critères du cahier des charges.

Cette solution permet de numériser des surfaces réfléchissantes avec une précision suffisante pour satisfaire le cahier des charges, et ce malgré le problème que la réflectivité peut poser comme on peut le voir sur la Figure 1.25. Elle est aussi très intéressante pour les entreprises qui ne voudraient pas investir lourdement dans des systèmes de numérisation. Cette solution reste à bas coût et très facilement utilisable. En effet, les formations pour apprendre à utiliser chaque système restent très simples et courtes.

Cette solution laisse encore la porte ouverte à d'autres recherches. En effet, certains aspects peuvent encore être améliorés. Le calage du nuage de points sur le maillage a été réalisé manuellement, mais il pourrait être automatisé. L'erreur introduite par cette manipulation manuelle n'a pas été prise en compte. De plus, nous ne sommes pas allés jusqu'à tester ce processus sur une étude de cas réelle (dans une usine) avec toutes ses contraintes d'encadrement et d'accessibilité (ex : hauteur). C'est-à-dire que nous n'avons pas essayé ce processus sur une tuyauterie qui avait réellement besoin de modifications où nous serions venus faire les relevés et le traitement des données pour ensuite préfabriquer les tuyaux et les installer.

RECOMMANDATIONS

Comme soulevé lors de la conclusion, combiner les systèmes nous semble être une bonne solution pour notre partenaire industriel. En effet, la combinaison proposée répond à tous les critères du cahier des charges. Elle permet de numériser des tuyaux dont la surface réfléchive pourrait poser un problème avec d'autres technologies. De plus, cette solution est en deçà de notre critère financier fixé au début de ce projet. Néanmoins, le processus pourrait être amélioré. On pourrait automatiser le transfert des fichiers pour éviter des manipulations qui peuvent devenir laborieuses. L'utilisation d'API (*application programming interface*) pourrait permettre la communication entre les logiciels. Le maillage automatique du nuage de points importé sur SolidWorks© pourrait être étudié. L'automatisation du calage de nuage de points pourrait aussi être envisagée pour éliminer une intervention humaine pouvant induire une erreur dans l'estimation de l'encombrement. Pour cela, on pourrait utiliser des algorithmes ICP (*Iterative Closest Point* ou *Iterative Corresponding Point*) (Meng, Li, & Gao, 2019). Aussi; pour faciliter le recalage, on pourrait utiliser une structure rigide composée de 3 sphères et d'une règle graduée. En effet, les 3 sphères usinées avec une grande précision permettraient de caler les nuages de points. Pour cela il faudrait que cette structure fasse partie des numérisations provenant de la lumière structurée et de la photogrammétrie. Quant à la règle graduée elle permettrait une mise à l'échelle précise pour la photogrammétrie. Enfin, le niveau d'incertitude engendré par les fusions de plusieurs numérisations du scanneur à lumière structurée n'a pas été évalué et pourrait faire l'objet d'études complémentaires.

Par ailleurs, nous n'avons réalisé le processus que dans un cadre d'investigations expérimentales. Nous ne sommes pas allés jusqu'à la préfabrication des tuyaux et leur mise en place. Il faudrait donc tester ce processus dans un cas concret et le pousser jusqu'à la mise en place des tuyaux. Il faudrait aussi tester ce processus dans une tuyauterie en hauteur pour confirmer ou non si le processus est utilisable. Le processus serait donc totalement validé.

Lors de ce projet, nous avons écarté des solutions technologiques telles que le LiDAR à la suite de la lecture de la littérature. En effet, ses performances sur les surfaces réfléchives ne semblaient pas suffisantes (*voir* Figure 1.25). Néanmoins, des études plus poussées sur cette technologie dans le cas concret de tuyauterie industrielle pourraient être envisageables, car le LiDAR est très utilisé dans le domaine de la construction. De plus, les solutions avec LiDAR sont souvent assez automatisées, mais peuvent nécessiter une opération de nettoyage du nuage de points.

Enfin, l'option de faire appel à des consultants spécialisés dans la numérisation d'usine n'est pas à écarter. Cependant, même si elle ne nécessite pas d'investissement préalable, cette option ne serait pas forcément valable pour notre partenaire industriel.

ANNEXE I

DONNÉES DES ESSAIS DANS LE LABORATOIRE MÉTROLOGIQUE

Tableau-A I-1 Données des essais dans le laboratoire de métrologie sur l'échantillon de tuyaux à l'aide du scanneur 3D à lumière structurée (diamètre)

Résolution Scanneur	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm	Moy - enne	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm	Moy - enne	Moy - enne
SCAN ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	Avec lumi- ère	6	7	8	9	10	Sans lumi- ère	
Tuyau 1	26,9	27,2	27,3	27,3	27,3	27,2	26,9	27,0	27,0	27,3	27,7	27,2	27,2
Écart à la moyenne	0,3	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,3	0,3	0,4	0,7	1,0	0,5	0,56
Pourcentage	1,1 %	2,2 %	2,4 %	2,6 %	2,4 %	2,1 %	1,0 %	1,3 %	1,3 %	2,6 %	3,9 %	2,0 %	2,1 %
Tuyau 2	42,3	42,3	42,5	42,2	42,2	42,3	42,3	42,1	42,3	42,4	42,3	42,3	42,3
Écart à la moyenne	0,2	0,2	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,2	0,3	0,2	0,2	0,19
Pourcentage	0,5 %	0,5 %	0,9 %	0,3 %	0,3 %	0,5 %	0,4 %	0,1 %	0,4 %	0,7 %	0,5 %	0,4 %	0,5 %
Tuyau 3	28,8	29,0	29,1	29,2	28,7	29,0	28,8	28,9	28,7	28,9	29,0	28,9	28,9
Écart à la moyenne	0,0	0,2	0,2	0,4	-0,1	0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,0	0,1	0,0	0,07
Pourcentage	0,1 %	0,7 %	0,7 %	1,4 %	0,5 %	0,7 %	0,3 %	0,2 %	0,4 %	0,2 %	0,5 %	0,3 %	0,5 %
Tuyau 4	47,9	48,0	48,0	47,8	47,9	47,9	48,0	47,8	47,9	48,2	47,9	47,9	47,9
Écart à la moyenne	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,1	0,2	0,0	0,0	-0,02
Pourcentage	0,1 %	0,0 %	0,0 %	0,4 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,4 %	0,2 %	0,5 %	0,0 %	0,2 %	0,2 %
Tuyau 5	33,6	33,6	34,0	33,4	33,5	33,6	33,4	33,3	34,0	34,0	33,5	33,6	33,6
Écart à la moyenne	0,1	0,0	0,5	-0,1	0,0	0,1	-0,1	-0,2	0,5	0,5	0,0	0,1	0,12
Pourcentage	0,4 %	0,1 %	1,4 %	0,4 %	0,1 %	0,5 %	0,2 %	0,5 %	1,4 %	1,4 %	0,0 %	0,7 %	0,6 %
Tuyau 6	60,7	60,8	60,9	60,6	60,8	60,8	60,7	60,6	60,6	61,2	60,7	60,8	60,8
Écart à la moyenne	-0,1	-0,1	0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	0,3	-0,2	-0,1	-0,12
Pourcentage	0,2 %	0,2 %	0,1 %	0,4 %	0,1 %	0,2 %	0,3 %	0,4 %	0,5 %	0,5 %	0,4 %	0,4 %	0,3 %
Moyenne totale	0.7%						0.7%						0,7 %

Tableau-A I-2 Données des essais dans le laboratoire de métrologie sur l'échantillon de tuyaux à l'aide de la photogrammétrie (diamètre)

Nombre de photos (et résolution)	45 photos (12 MP)	84 photos (12 MP)	84 photos (12 MP)	84 photos (12 MP)	Moyenne 84 photos (12 MP)	100 photos (50 MP)
SCAN ÉCHANTILLON N	1	2	3	4		5
Tuyau 1	22,6	28,2	28,9	28,2	28,44	26,7
Écart à la moyenne	-4,0	1,6	2,3	1,6	1,81	0,1
Pourcentage	15,1%	5,9%	8,5%	5,9%	6,8%	0,4%
Tuyau 2	44,2	43,6	44,0	43,9	43,83	40,2
Écart à la moyenne	2,1	1,5	1,9	1,8	1,73	-1,9
Pourcentage	4,9%	3,6%	4,4%	4,3%	4,1%	4,4%
Tuyau 3	27,7	28,0	28,6	29,7	28,75	26,8
Écart à la moyenne	-1,1	-0,8	-0,3	0,9	-0,09	-2,0
Pourcentage	3,8%	2,9%	1,0%	3,0%	2,3%	7,1%
Tuyau 4	49,3	45,8	45,5	46,1	45,79	47,3
Écart à la moyenne	1,4	-2,1	-2,5	-1,9	-2,16	-0,7
Pourcentage	2,9%	4,4%	5,1%	3,9%	4,5%	1,4%
Tuyau 5	41,9	33,53	35,4	37,2	35,38	31,9
Écart à la moyenne	8,4	0,03	1,9	3,7	1,88	-1,6
Pourcentage	25,1%	0,1%	5,6%	11,1%	5,6%	4,8%
Tuyau 6	61,9	61,7	58,7	62,8	61,07	61,2
Écart à la moyenne	1,0	0,8	-2,1	1,9	0,19	0,3
Pourcentage	1,6%	1,3%	3,5%	3,1%	2,7%	0,4%
Moyenne	8,9%	4,3%				3,1%

Tableau-A I-3 Données des essais dans le laboratoire de métrologie sur l'échantillon de tuyaux à l'aide du scanneur 3D à lumière structurée (longueur)

Résolution	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm	Moy e-nne	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm	Moye -nne	Moy enne
SCAN ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	Avec lumi- ère	6	7	8	9	10	Sans lumi- ère	
Tuyau 1	944,4	944,5	945,5	945,5	945,0	945,0	956,2	945,7	943,9	944,0	945,6	947,1	946,0
Écart à la moyenne	-5,1	-5,0	-4,0	-4,0	-4,5	-4,5	6,7	-3,8	-5,6	-5,5	-3,9	-2,4	-3,46
Pourcentage	0,5%	0,5%	0,4%	0,4%	0,5%	0,5%	0,7%	0,4%	0,6%	0,6%	0,4%	0,5%	0,5%
Tuyau 2	695,2	694,0	694,0	694,8	693,4	694,3	695,3	796,3	693,9	694,4	693,4	714,7	704,5
Écart à la moyenne	-9,3	-10,5	-10,5	-9,7	-11,1	-10,2	-9,2	91,8	-10,6	-10,1	-11,2	10,2	-0,03
Pourcentage	1,3%	1,5%	1,5%	1,4%	1,6%	1,5%	1,3%	13,0 %	1,5%	1,4%	1,6%	3,8%	2,6%
Tuyau 3	1 660,9	1 688,8	1 573,1	1 690,7	1 688,5	1 660,4	1 689,5	1 688,6	1 689,3	1 689,7	1 690,4	1 689,5	1 674,9
Écart à la moyenne	-46,1	-18,2	- 133,9	-16,3	-18,5	-46,6	-17,5	-18,4	-17,7	-17,3	-16,6	-17,5	- 32,06
Pourcentage	2,7%	1,1%	7,8%	1,0%	1,1%	2,7%	1,0%	1,1%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,9%
Tuyau 4	1 225,4	1 217,9	1 216,2	1 217,6	1 225,4	1 220,5	1 227,9	1 221,6	1 220,4	1 218,1	1 217,7	1 221,1	1 220,8
Écart à la moyenne	-9,1	-16,6	-18,3	-16,9	-9,1	-14,0	-6,6	-12,9	-14,1	-16,4	-16,8	-13,4	- 13,68
Pourcentage	0,7%	1,3%	1,5%	1,4%	0,7%	1,1%	0,5%	1,0%	1,1%	1,3%	1,4%	1,1%	1,1%
Tuyau 5	1 082,9	1 082,4	1 082,3	1 083,8	1 085,6	1 083,4	1 082,3	1 082,0	1 080,6	1 081,3	1 083,9	1 082,0	1 082,7
Écart à la moyenne	-9,1	-9,6	-9,7	-8,2	-6,4	-8,6	-9,7	-10,0	-11,4	-10,7	-8,1	-10,0	-9,31
Pourcentage	0,8%	0,9%	0,9%	0,7%	0,6%	0,8%	0,9%	0,9%	1,0%	1,0%	0,7%	0,9%	0,9%
Tuyau 6	1 216,3	1 217,2	1 216,4	1 214,4	1 216,7	1 216,2	1 214,6	1 214,2	1 253,4	1 216,4	1 214,9	1 222,7	1 219,5
Écart à la moyenne	-12,2	-11,3	-12,1	-14,1	-11,8	-12,3	-13,9	-14,3	24,9	-12,1	-13,6	-5,8	-9,04
Pourcentage	1,0%	0,9%	1,0%	1,1%	1,0%	1,0%	1,1%	1,2%	2,0%	1,0%	1,1%	1,3%	1,1%
Moyenne totale	1.3%						1.4%						1,3%

Tableau-A I-4 Données des essais dans le laboratoire de métrologie sur l'échantillon de tuyaux à l'aide de la photogrammétrie (longueur)

Nombre de photos (et résolution)	45 photos (12 MP)	84 photos (12 MP)	84 photos (12 MP)	84 photos (12 MP)	Moyenne 84 photos (12 MP)	100 photos (50 MP)
SCAN ÉCHANTILLON	1	2	3	4		5
Tuyau 1	980,8	986,5	982,1	933,8	967,5	949,8
Écart à la moyenne	31,3	37,0	32,6	-15,7	18,0	0,3
Pourcentage	3,3%	3,9%	3,4%	1,7%	3%	0,03%
Tuyau 2	710,1	678,4	674,4	680,2	677,7	693,9
Écart à la moyenne	5,6	-26,1	-30,1	-24,3	-26,8	-10,6
Pourcentage	0,8%	3,7%	4,3%	3,4%	3,8%	1,5%
Tuyau 3	1 732,1	1 673,8	1 662,8	1 682,1	1 672,9	1 702,8
Écart à la moyenne	25,1	-33,2	-44,2	-24,9	-34,1	-4,2
Pourcentage	1,5%	1,9%	2,6%	1,5%	2%	0,2%
Tuyau 4	1 273,8	1 211,1	1 202,7	1 215,8	1 209,9	1 228,7
Écart à la moyenne	39,3	-23,4	-31,8	-18,7	-24,6	-5,8
Pourcentage	3,2%	1,9%	2,6%	1,5%	2%	0,5%
Tuyau 5	1 132,9	897,8	1 097,3	1 110,3	1 035,2	1 088,3
Écart à la moyenne	40,9	-194,2	5,3	18,3	-56,9	-3,7
Pourcentage	3,7%	17,8%	0,5%	1,7%	6,7%	0,3%
Tuyau 6	1 271,6	1 206,8	1 197,6	1 212,8	1 205,7	1 223,5
Écart à la moyenne	43,1	-21,7	-30,9	-15,7	-22,8	-5,0
Pourcentage	3,5%	1,8%	2,5%	1,3%	1,9%	0,4%
Moyenne	2,6 %	3,2%				0,5%

Tableau-A I-5 Données des essais pour la comparaison des logiciels de rétro-ingénierie – *VxModel*© (lumière structurée, diamètre)

Résolution	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	2 mm	2 mm	Moyenne
SCAN ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	
Tuyau 1	26,3	27,1	25,6	27,3	27,1	27,2	26,8
Écart	-0,3	0,4	-1,0	0,7	0,5	0,6	0,1
Pourcentage	1,3%	1,6%	3,9%	2,5%	1,9%	2,2%	0,5%
Tuyau 2	41,8	42,8	42,5	42,8	42,7	42,6	42,5
Écart	-0,3	0,7	0,4	0,6	0,6	0,5	0,4
Pourcentage	0,7%	1,6%	1,0%	1,5%	1,5%	1,1%	1%
Tuyau 3	28,7	29,2	28,7	29,3	29,0	28,9	29,0
Écart	-0,2	0,3	-0,2	0,5	0,2	0,1	0,1
Pourcentage	0,6%	1,2%	0,7%	1,6%	0,7%	0,2%	0,4%
Tuyau 4	48,5	48,2	48,3	48,4	48,4	48,1	48,3
Écart	0,6	0,3	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4
Pourcentage	1,2%	0,6%	0,7%	1,0%	0,9%	0,4%	0,8%
Tuyau 5	33,9	33,9	33,9	33,8	33,8	33,8	33,9
Écart	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4
Pourcentage	1,2%	1,3%	1,3%	0,9%	0,9%	0,9%	1,1%
Tuyau 6	60,8	60,5	61,2	60,8	61,0	60,7	60,8
Écart	-0,1	-0,4	0,4	-0,1	0,1	-0,2	-0,05
Pourcentage	0,1%	0,6%	0,6%	0,1%	0,2%	0,4%	0,1%
Moyenne							0,7%

Tableau-A I-6 Données des essais pour la comparaison des logiciels de rétro-ingénierie – *PolyWorks*© (lumière structurée, diamètre)

Résolution	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	2 mm	2 mm	Moyenne
SCAN ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	
Tuyau 1	26,5	26,4	26,5	27,2	27,4	27,2	26,9
Écart	-0,1	-0,3	-0,1	0,6	0,8	0,6	0,25
Pourcentage	0,4%	1,0%	0,5%	2,3%	3,0%	2,3%	0,9%
Tuyau 2	40,5	42,8	42,1	42,7	42,6	42,6	42,2
Écart	-1,6	0,7	0,0	0,5	0,5	0,5	0,11
Pourcentage	3,7%	1,6%	0,0%	1,3%	1,3%	1,1%	0,3%
Tuyau 3	28,3	29,0	28,1	29,3	28,8	28,9	28,8
Écart	-0,5	0,2	-0,7	0,5	-0,1	0,0	-0,10
Pourcentage	1,9%	0,7%	2,4%	1,6%	0,2%	0,1%	0,4%
Tuyau 4	48,2	48,1	48,4	48,1	48,5	48,0	48,2
Écart	0,3	0,2	0,5	0,1	0,5	0,0	0,25
Pourcentage	0,5%	0,4%	1,0%	0,2%	1,1%	0,0%	0,5%
Tuyau 5	33,9	33,8	33,7	33,8	33,8	33,9	33,8
Écart	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,34
Pourcentage	1,3%	1,0%	0,7%	0,9%	1,0%	1,2%	1%
Tuyau 6	60,8	60,1	61,0	60,7	61,1	60,6	60,7
Écart	-0,1	-0,8	0,1	-0,1	0,2	-0,3	-0,16
Pourcentage	0,1%	1,3%	0,2%	0,2%	0,3%	0,5%	0,3%
Moyenne							0,6%

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barbero, B. R., & Ureta, E. S. (2011). Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Computer-Aided Design*, 43(2), 188-206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.11.005>
- Creaform©. (2014). *An introduction to 3D scanning*. In Vol. 1. C. E. Series (Ed.).
- Diagramme schématique de l'interféromètre de Michelson. (2013). In *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. Consulté le 14 Février 2018 à 14h
- Faro®. (2015). Technologie, fonctionnement, applications et prix du Laser Tracker. Retrieved from <http://blog-fr.faro.com/2015/05/05/technologie-fonctionnement-applications-et-prix-du-laser-tracker/> Consulté le 21 Février 2018 à 14h
- Fidera, A., Chapman, M. A., & Hong, J. (2004, Juillet). *Terrestrial lidar for industrial metrology applications: modelling, enhancement and reconstruction*. Paper presented at the XXth ISPRS congress, Istanbul.
- Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., & Mastrogiacomo, L. (2014). Large-scale dimensional metrology (LSDM): from tapes and theodolites to multi-sensor systems. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(8), 1739-1758. doi: <https://10.1007/s12541-014-0527-2>
- Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., & Mastrogiacomo, L. (2016). Combining multiple Large Volume Metrology systems: Competitive versus cooperative data fusion. *Precision Engineering*, 43, 514-524. doi:<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.09.014>
- Franceschini, F., & Maisano, D. (2014). The evolution of large-scale dimensional metrology from the perspective of scientific articles and patents. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5), 887-909. doi: <https://10.1007/s00170-013-5317-y>
- Gąska, A., Krawczyk, M., Kupiec, R., Ostrowska, K., Gąska, P., & Sładek, J. (2014). Modeling of the residual kinematic errors of coordinate measuring machines using LaserTracer system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1), 497-507. doi: <https://10.1007/s00170-014-5836-1>
- InnovMetricLogiciels. (2010). Numérisation sans contact à haute densité. *Étude sur le hardware de la métrologie 3D*, 45.

- Kumar, P. T. (2015). *Inspection of As-Built Piping System for Design Consistency using Point Clouds and CAD Model*. 서울대학교 대학원, Retrieved from <http://hdl.handle.net/10371/122744> Consulté le 20 Février 2019 à 14h
- Limahn, K. (2014). Lidar. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. Consulté le 14 Février 2018 à 14h
- Meng, J., Li, J., & Gao, X. (2019). *An accelerated ICP registration algorithm for 3D point cloud data* (Vol. 10839): SPIE.
- Metris3D. (2010). iSpace. Retrieved from http://www.metris3d.hu/termekeink/nagy_volumenu_cmm_merogepek/ispace.html Consulté le 18 Février 2018 à 15h
- Monniaux, D. (2007). Lidar. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. Consulté le 14 Février 2018 à 14h
- NikonMetrology. (2016). iGPS - Factory-wide measuring, positioning and tracking system. Retrieved from <https://www.nikonmetrology.com/en-us/product/igps> Consulté le 12 Février 2018 à 14h
- Peggs, G. N., Maropoulos, P. G., Hughes, E. B., Forbes, A. B., Robson, S., Ziebart, M., & Muralikrishnan, B. (2009). Recent developments in large-scale dimensional metrology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(6), 571-595. doi: <https://10.1243/09544054jem1284>
- Schmitt, R. H., Peterek, M., Morse, E., Knapp, W., Galetto, M., Härtig, F., . . . Estler, W. T. (2016). Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends. *CIRP Annals*, 65(2), 643-665. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.002>
- SolidWorksHelp. (2012). Présentation de ScanTo3D. Retrieved from http://help.solidworks.com/2018/french/SolidWorks/scanto3d/c_Scanto3d_overview.htm Consulté le 18 Mars 2018 à 14h
- Tompalski, P., Coops, N. C., Marshall, P. L., White, J. C., Wulder, M. A., & Bailey, T. (2018). Combining Multi-Date Airborne Laser Scanning and Digital Aerial Photogrammetric Data for Forest Growth and Yield Modelling. *Remote Sensing*, 10(2), 347.
- Valente, C. (2017, 2017). Capture 3D par photogrammétrie. Retrieved from <https://methodesbtp.com/articles/capture-3d-photogrammetrie/> Consulté le 23 Avril 2018 à 14h

BIBLIOGRAPHIE

- Mesure sans contact. (2000). *J'automatise*, n°9, 44-47.
- Diagramme schématique de l'interféromètre de Michelson. (2013). In *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. Consulté le 14 Février 2018 à 14h
- Barbato, G., Genta, G., Cagliero, R., Galetto, M., Klopstein, M. J., Lucca, D. A., & Levi, R. (2017). Uncertainty evaluation of indentation modulus in the nano-range: Contact stiffness contribution. *CIRP Annals*, 66(1), 495-498. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.060>
- Barbero, B. R., & Ureta, E. S. (2011). Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Computer-Aided Design*, 43(2), 188-206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.11.005>
- Chow, J. (2014). *Multi-Sensor Integration for Indoor 3D Reconstruction*. (Thèse de doctorat, Université de Calgary, Canada, AB)
- Creaform®. (2014). *An introduction to 3D scanning*. In Vol. 1. C. E. Series (Ed.).
- Faro®. (2015). Technologie, fonctionnement, applications et prix du Laser Tracker. Retrieved from <http://blog-fr.faro.com/2015/05/05/technologie-fonctionnement-applications-et-prix-du-laser-tracker/> Consulté le 21 Février 2018 à 14h
- Fidera, A., Chapman, M. A., & Hong, J. (2004, Juillet). *Terrestrial lidar for industrial metrology applications: modelling, enhancement and reconstruction*. Paper presented at the XXth ISPRS congress, Istanbul.
- Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., & Mastrogiacomo, L. (2014). Large-scale dimensional metrology (LSDM): from tapes and theodolites to multi-sensor systems. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(8), 1739-1758. doi: <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0527-2>
- Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., & Mastrogiacomo, L. (2016). Combining multiple Large Volume Metrology systems: Competitive versus cooperative data fusion. *Precision Engineering*, 43, 514-524. doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.09.014>
- Franceschini, F., & Maisano, D. (2014). The evolution of large-scale dimensional metrology from the perspective of scientific articles and patents. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5), 887-909. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5317-y>

- Gąska, A., Krawczyk, M., Kupiec, R., Ostrowska, K., Gąska, P., & Śladek, J. (2014). Modeling of the residual kinematic errors of coordinate measuring machines using LaserTracer system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1), 497-507. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5836-1>
- Guangzhi, Z., & Guigang, S. (2010, 4-6 Dec. 2010). *Research on 3D laser scanning field working method of ancient architecture scene*. Paper presented at the The 2nd International Conference on Information Science and Engineering, Hangzhou, China.
- Huber, D., Akinci, B., Tang, P., Adan, A., Okorn, B., & Xuehan, X. (2010, 17-19 March 2010). *Using laser scanners for modeling and analysis in architecture, engineering, and construction*. Paper presented at the 2010 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), New Jersey, USA.
- InnovMetricLogiciels. (2010). Numérisation sans contact à haute densité. *Étude sur le hardware de la métrologie 3D*, 45.
- Kumar, P. T. (2015). *Inspection of As-Built Piping System for Design Consistency using Point Clouds and CAD Model*. 서울대학교 대학원, Retrieved from <http://hdl.handle.net/10371/122744> Consulté le 20 Février 2019 à 14h
- Limahn, K. (2014). Lidar. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre*.
- Meng, J., Li, J., & Gao, X. (2019). *An accelerated ICP registration algorithm for 3D point cloud data* (Vol. 10839): SPIE.
- Metris3D. (2010). iSpace. Retrieved from http://www.metris3d.hu/termekeink/nagy_volumenu_cmm_merogepek/ispace.html Consulté le 18 Février 2018 à 15h
- Monniaux, D. (2007). Lidar. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. Consulté le 14 Février 2018 à 14h
- NikonMetrology. (2016). iGPS - Factory-wide measuring, positioning and tracking system. Retrieved from <https://www.nikonmetrology.com/en-us/product/igps> Consulté le 12 Février 2018 à 14h
- Parrini, F., Papi, F., & Pieraccini, M. (2015, 7-10 July 2015). *An ultra high-resolution stepped frequency GPR for civil engineering applications*. Paper presented at the 2015 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), USA.

- Peggs, G. N., Maropoulos, P. G., Hughes, E. B., Forbes, A. B., Robson, S., Ziebart, M., & Muralikrishnan, B. (2009). Recent developments in large-scale dimensional metrology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(6), 571-595. doi: <https://doi.org/10.1243/09544054jem1284>
- Randall, T. (2011). Construction Engineering Requirements for Integrating Laser Scanning Technology and Building Information Modeling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(10), 797-805. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000322](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000322)
- Schmitt, R. H., Peterek, M., Morse, E., Knapp, W., Galetto, M., Härtig, F., . . . Estler, W. T. (2016). Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends. *CIRP Annals*, 65(2), 643-665. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.002>
- SolidWorksHelp. (2012). Présentation de ScanTo3D. Retrieved from http://help.solidworks.com/2018/french/SolidWorks/scanto3d/c_Scanto3d_overview.htm Consulté le 18 Mars 2018 à 14h
- Tompalski, P., Coops, N. C., Marshall, P. L., White, J. C., Wulder, M. A., & Bailey, T. (2018). Combining Multi-Date Airborne Laser Scanning and Digital Aerial Photogrammetric Data for Forest Growth and Yield Modelling. *Remote Sensing*, 10(2), 347.
- Valente, C. (2017, 2017). Capture 3D par photogrammétrie. Retrieved from <https://methodesbtp.com/articles/capture-3d-photogrammetrie/> Consulté le 23 Avril 2018 à 14h
- Zhang, R., Wang, Y., & Song, D. (2009, 26-28 Dec. 2009). *Research on 3D Reconstruction Using Laser Scanning Data Acquired from Ancient Architecture*. Paper presented at the 2009 First International Conference on Information Science and Engineering.