

UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE  
CLERMONT-FERRAND

---

ÉCOLE UNIVERSITAIRE DE PHYSIQUE ET D'INGÉNIERIE

---

RAPPORT DE PROJET DE SYNTHÈSE  
2ÈME ANNÉE DE MASTER

---

SPÉCIALITÉ : MÉCATRONIQUE

ALBALADEJO JORIS

Réalisation d'un Scanner 3D  
pour une application de contrôle qualité



DATE DE SOUTENANCE : 31 JANVIER 2023

## Liste des abréviations

- 3D** 3 Dimensions  
**ASCII** American Standard Code for Information Interchange  
**CCD** Charge Coupled Device  
**CMOS** Complementary Metal Oxide Semiconductor  
**DSE** Digitized Shape Editor  
**HSV** Hue Saturation Value  
**IDS** Imaging Development Systems  
**IP** Indice de Protection  
**KUKA** Keller Und Knappich Augsburg  
**RVB** Rouge Vert Bleu  
**TP** Travaux Pratiques

## Table des matières

<b>Table des figures</b>	<b>3</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>3</b>
<b>Remerciements</b>	<b>4</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>5</b>
<b>2 État de l'art</b>	<b>6</b>
2.1 Reconstruction par vision stéréoscopique . . . . .	6
2.2 Reconstruction par lumière structurée . . . . .	7
2.3 Reconstruction par triangulation laser . . . . .	8
2.4 Conclusion . . . . .	9
<b>3 Cahier des charges du projet</b>	<b>9</b>
<b>4 Présentation du matériel utilisé</b>	<b>10</b>
4.1 Caméra . . . . .	10
4.2 Laser . . . . .	11
4.3 Objectif . . . . .	12
4.4 Robot <i>Keller Und Knappich Augsburg</i> (KUKA) . . . . .	13
<b>5 Réalisation du Scanner</b>	<b>14</b>
5.1 Mise en place du dispositif d'acquisition . . . . .	14
5.2 Étalonnage . . . . .	16
5.3 Paramètres d'acquisition . . . . .	18
5.4 Utilisation du système . . . . .	18
5.4.1 Traitement des images capturées . . . . .	18
5.4.2 Extraction des coordonnées du faisceau laser . . . . .	19
5.4.3 Création du nuage de points . . . . .	20
5.4.4 Import du nuage de points sur <i>Catia</i> . . . . .	22
<b>6 Axes d'amélioration</b>	<b>24</b>
6.1 Automatisation du processus d'acquisition . . . . .	24
6.2 Optimisation de la partie software . . . . .	24
6.3 Établissement d'un benchmark pour valider les résultats obtenus . . . . .	24
6.4 Utilisation d'une méthode de reconstruction . . . . .	24
<b>7 Conclusion</b>	<b>25</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>26</b>

## Table des figures

2.1.1 Visualisation d'un objet par stéréovision [1] . . . . .	6
2.1.2 Principe de géométrie épipolaire [2] . . . . .	6
2.2.1 Schéma explicatif de la reconstruction par lumière structurée [3] . . . . .	7
2.2.2 Résultat d'une reconstruction par lumière structurée [4] . . . . .	7
2.3.1 Schéma de présentation de la triangulation laser [5] . . . . .	8
2.3.2 Observation de la différence de hauteur dans la réalité dans l'image . . . . .	8
4.1.1 Modèle de caméra utilisé . . . . .	10
4.2.1 Modèle de laser utilisé . . . . .	11
4.3.1 Modèle d'objectif utilisé . . . . .	12
4.4.1 Modèle de robot utilisé . . . . .	13
4.4.2 Dimensions et champ d'action du robot . . . . .	13
5.1.1 Dispositif d'acquisition des images . . . . .	14
5.1.2 Capture d'une image de la tôle avec notre dispositif . . . . .	15
5.1.3 Schémas du montage en perspective (à gauche) et vu de côté (à droite) . . . . .	15
5.2.1 Images d'étalonnage du système . . . . .	16
5.2.2 Centroïdes des lignes de laser dans les images étalons . . . . .	17
5.2.3 Schéma d'établissement de la distance en pixels entre 2 lignes de laser . . . . .	17
5.4.1.1 Présentation des traitements appliquées aux images capturées . . . . .	18
5.4.2.1 Algorigramme d'extraction des coordonnées du laser dans les images . . . . .	19
5.4.3.1 Algorigramme de création du nuage de points 3D . . . . .	20
5.4.3.2 Nuage de points 3D obtenu sans filtrage . . . . .	20
5.4.3.3 Nuage de points 3D obtenu après filtrage . . . . .	21
5.4.3.4 Nuage de points 3D obtenu après remise à l'échelle . . . . .	21
5.4.4.1 Conversion du fichier texte au format American Standard Code for Information Interchange (ASCII) . . . . .	22
5.4.4.2 Ouverture de l'atelier <i>DSE</i> . . . . .	22
5.4.4.3 Import du fichier American Standard Code for Information Interchange (ASCII) sur <i>Catia</i> . . . . .	23
5.4.4.4 Visualisation du nuage de points sur <i>Catia</i> . . . . .	23

## Liste des tableaux

3.1 Cahier des charges du projet . . . . .	9
4.1.1 Caractéristiques techniques du capteur optique . . . . .	10
4.2.1 Caractéristiques techniques du laser . . . . .	11
4.3.1 Caractéristiques techniques de l'objectif . . . . .	12
4.4.1 Caractéristiques techniques du robot . . . . .	13

## Remerciements

Je souhaiterais remercier M. Dumas pour m'avoir proposé ce sujet comme projet de fin d'études ainsi que pour son écoute. Ses propositions et les solutions dont nous avons pu discuter pour le mener à bien m'ont permis de me débloquer lorsque c'était nécessaire.

Dans un second temps j'aimerais également remercier M. Benoit Thuilot et Mme Céline Teulière, membres du jury lors de ma soutenance, pour les remarques constructives qu'ils ont pu apporter afin de m'aider dans ma manière d'aborder ma démarche dans le cadre de la réalisation d'un projet.

Enfin, je voudrais dire merci à mes camarades de cours, avec qui j'ai pu échanger tout au long du projet pour discuter des solutions à mettre en oeuvre ainsi que leur aide lorsque je me posais des questions pour la mise en oeuvre du projet.

## 1 Introduction

Afin d'améliorer la qualité de pièces réalisées sur une ligne de production et de diminuer les coûts engendrés par un potentiel re travail des pièces en sortie de ligne, le milieu industriel cherche à s'appuyer sur des méthodes de contrôle toujours plus performantes. Pour cela, une technologie se développe de plus en plus ces dernières années : le contrôle par vision. Cette technologie de contrôle permet de s'assurer de la conformité d'une pièce produite par rapport aux critères attendus par le fabricant directement sur une ligne de fabrication, ce qui permet d'améliorer le rendement de production ainsi que la satisfaction du client qui reçoit un produit plus solide, et entièrement conforme à ses attentes.

Du 19 Septembre 2022 au 31 Janvier 2023 j'ai mené un projet visant à réaliser un scanner par nuage de points 3D pour faire de la reconstruction d'objet et du contrôle qualité dans le cadre de mon Master 2 Mécatronique.

Durant ces quatre mois j'ai eu l'occasion de mettre en pratique les différentes notions vues dans le cadre du cours de traitement d'images sur un projet concret. J'ai saisi l'opportunité de ce projet car je souhaitais améliorer mes compétences en traitement d'images et me suis donc dit que je pourrais me challenger en essayant de réaliser cet outil de reconstruction 3 Dimensions (3D) pour consolider les bases acquises au cours de mon Master.

Au cours de ce rapport, nous réaliserons tout d'abord un état de l'art sur les méthodes de reconstruction 3D existantes. Par la suite nous présenterons de manière plus détaillée la méthode utilisée pour réaliser ce projet à savoir la triangulation laser. Dans la suite du développement nous aborderons mon travail, en expliquant plus en détail la manière dont j'ai abordé ce projet et les différents problèmes que j'ai pu rencontrer pour le réaliser ainsi que les solutions appliquées pour les résoudre. Enfin nous aborderons les axes d'amélioration envisageables et nous conclurons sur ce que j'ai pu apprendre tout au long de cette période.

## 2 État de l'art

Les méthodes de reconstruction par nuages de points 3D constituent un ensemble de techniques utilisées pour capturer et représenter les caractéristiques physiques d'un objet, d'un environnement ou d'un espace sous la forme d'un ensemble de points de données dans un espace tridimensionnel. Il existe plusieurs méthodes de numérisation par nuages de points 3D, chacune avec ses propres avantages et limites. Les techniques présentées ici se concentrent uniquement sur les méthodes de reconstructions utilisant des capteurs Charge Coupled Device (CCD) ou Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS).

### 2.1 Reconstruction par vision stéréoscopique

Pour utiliser cette méthode, il faut utiliser 2 caméras ou plus ayant un angle de vue différent sur l'objet, pour capturer des images sous différentes perspectives, comme on peut le voir en figure 2.1.1.

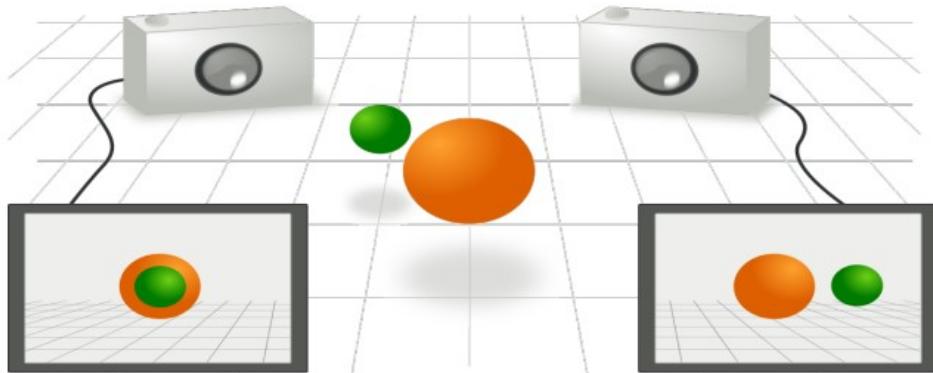


FIGURE 2.1.1 – Visualisation d'un objet par stéréovision [1]

Chacune des images prises est ensuite utilisée pour calculer les informations de profondeur en fonction de chaque pixel de l'image, grâce à ce que l'on appelle la géométrie épipolaire. Ce modèle mathématique permet la mise en correspondance de pixels situés à des endroits différents dans les images mais correspondant à un seul et même point de l'objet (voir figure 2.1.2).

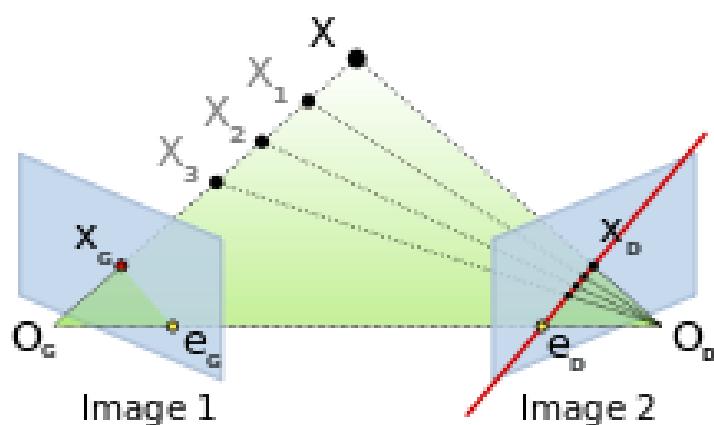


FIGURE 2.1.2 – Principe de géométrie épipolaire [2]

Cette méthode est relativement peu coûteuse et efficace, mais nécessite d'avoir des caméras parfaitement calibrées et de connaître exactement la distance en translation entre et l'angle de rotation entre les caméras.

## 2.2 Reconstruction par lumière structurée

La seconde méthode que nous allons présenter est le balayage par lumière structurée. Avec celle-ci, on projette un motif de lumière sur l'objet et on utilise une caméra pour enregistrer le motif déformé lorsqu'il se reflète sur la surface de l'objet (voir 2.2.1).

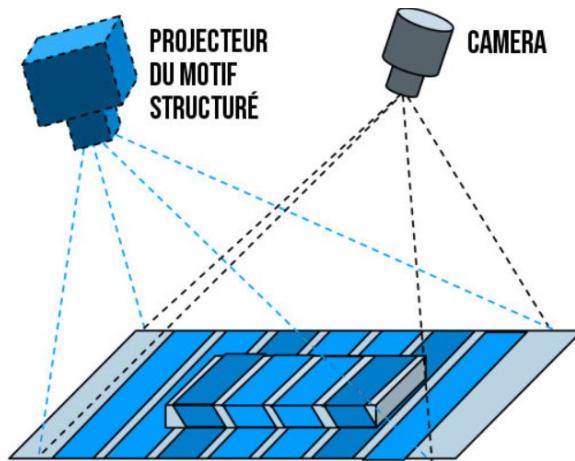


FIGURE 2.2.1 – Schéma explicatif de la reconstruction par lumière structurée [3]

Ce dernier est ensuite utilisé pour calculer les informations de profondeur pour chaque pixel de l'image, ce qui permet d'avoir une reproduction fidèle à l'objet visualisé (voir figure 2.2.2).

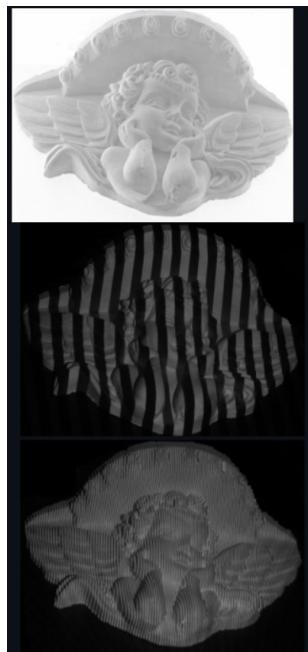


FIGURE 2.2.2 – Résultat d'une reconstruction par lumière structurée [4]

Comme la reconstruction par vision stéréoscopique, la reconstruction par lumière structurée est relativement rapide et efficace. De plus, elle peut être utilisée pour capturer des informations détaillées à partir d'objets plus petits, ce qui peut présenter un avantage selon l'objet que l'on souhaite reconstruire.

### 2.3 Reconstruction par triangulation laser

Ce système est une des méthodes de mesure tridimensionnelle les plus anciennes, mais continue d'être utilisée dans des applications industrielles aujourd'hui encore. Un système de triangulation laser est généralement composé d'une source laser (émettant un faisceau sous forme de point ou de ligne) et d'une caméra permettant d'acquérir des images. Le principe de base de la triangulation laser est représenté sur la figure 2.3.1.

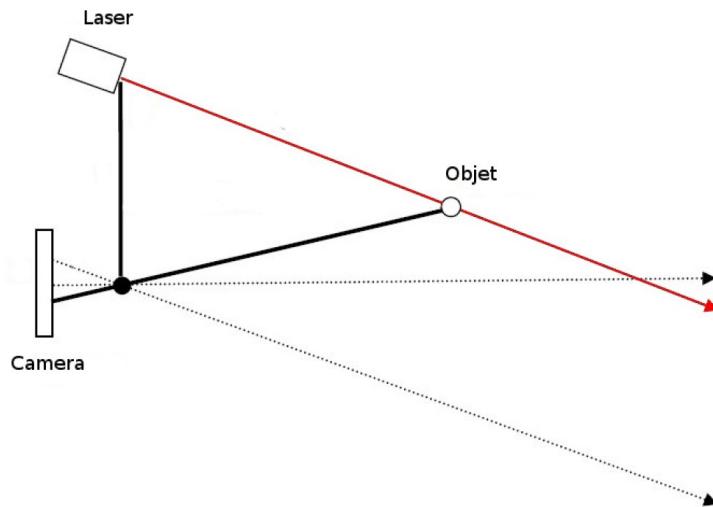


FIGURE 2.3.1 – Schéma de présentation de la triangulation laser [5]

Pour réaliser une reconstruction à l'aide de cette méthode, on se sert d'une variation de hauteur faisceau laser dans l'image pour reconstruire une variation de hauteur de l'objet physique dans la réalité en prenant en compte la distance focale  $f$  de la caméra, la distance en translation  $d$  et l'angle d'inclinaison  $\theta$  entre la caméra et la source émettant le laser (voir figure 2.3.2).

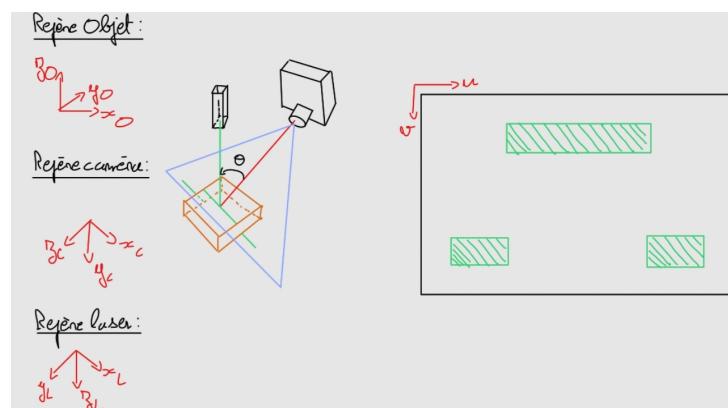


FIGURE 2.3.2 – Observation de la différence de hauteur dans la réalité dans l'image

En effet, en connaissant ces informations on peut établir la relation suivante :

$$(x, y, z) = \frac{d}{f \times \cot(\theta) - u}(u, v, f) \quad (1)$$

A l'instar des deux méthodes citées précédemment, elle reste très fiable car très précise (de l'ordre du micromètre). Néanmoins, elle trouve ses limites dans le cas où l'objet observé réfléchit énormément la lumière, ce qui rendra difficile la tâche de détection du faisceau laser dans les images capturées.

De plus, on ne peut pas l'utiliser sur de grandes distances car nous sommes limités par la distance focale de la caméra pour obtenir une image nette et l'augmentation de la distance peut induire une augmentation des bruits perçus par le capteur utilisé.

## 2.4 Conclusion

C'est cette dernière méthode que j'ai choisi d'utiliser dans le cadre de ce projet, car c'était celle qui paraissait la plus simple à mettre en oeuvre par rapport au matériel à disposition et à la précision qu'il est possible d'obtenir grâce à celle-ci.

## 3 Cahier des charges du projet

Maintenant que nous avons présenté les méthodes de reconstruction 3D existantes utilisant des capteurs CCD ou CMOS et que nous avons défini la méthode utilisée au cours du projet, nous allons présenter le cahier des charges (voir tableau 3.1) établi pour la réalisation de notre application du scanner, à savoir la reconstitution du profil d'une tôle afin de faire du contrôle qualité.

Contexte	Projet de fin d'études de Master 2
Durée	Du 19/09/2022 au 26/01/2023
Date Butoir	31/01/2023
Parties prenantes	Encadrant : M. Dumas Développeur : Étudiant
Objectifs	Réalisation d'un nuage de points 3D du profil de la tôle
Exigences fonctionnelles	Utilisation d'un robot <i>KUKA</i> pour déplacer la caméra et le laser Prise des images via le logiciel <i>uEye Cockpit</i> Restitution du profil de la tôle dans un nuage de points 3D importable sous <i>Catia</i>

TABLE 3.1 – Cahier des charges du projet

Notons que même si le choix du langage de programmation pour réaliser ce projet était libre, j'ai fait le choix d'utiliser *MATLAB* car c'était avec ce langage que nous avions réalisé les Travaux Pratiques (TP) durant le cours d'Image - Vision. En ce sens il me semblait plus simple et cohérent dans un premier temps d'utiliser ce dernier plutôt que de rajouter une contrainte nécessitant la découverte de nouvelles librairies comme *OpenCV* en *C++* ou en *Python*.

Maintenant que le cadre du projet est défini à l'aide de ce cahier des charges, nous allons présenter le matériel et qui a été utilisé tout au long du projet.

## 4 Présentation du matériel utilisé

Dans cette partie nous allons parler plus en détail des caractéristiques des différents outils utilisés pour réaliser le projet, et notamment s'il serait envisageable de les utiliser dans une application industrielle avec les contraintes que cela implique.

### 4.1 Caméra

Le modèle de caméra utilisé pour acquérir les images dans mon cas est le *UI-1225-LE-C-HQ* [6] (voir figure 4.1.1). Ce boîtier est fabriqué par l'entreprise *Imaging Development Systems* (IDS). Ce modèle de caméra fait partie de leur gamme de caméras à application industrielle *uEye*. Si l'on suit donc la réflexion du fabricant cette caméra serait donc idéale pour une utilisation industrielle, mais qu'en est il réellement si l'on se penche plus en détail sur les caractéristiques de celle-ci (voir tableau 4.1.1) ?



FIGURE 4.1.1 – Modèle de caméra utilisé

Type de capteur	CMOS Couleur
Résolution ( $H \times V$ )	752 × 480 Pixel
Convertisseur Analogique Numérique	10 bits
Profondeur des couleurs	8 bits
Classe de capteur optique	1/3"
Indice de protection	IP30

TABLE 4.1.1 – Caractéristiques techniques du capteur optique

Comme on peut le voir dans le tableau ci-dessus, le codage des informations contenues dans chaque pixel d'une image est effectué sur 10 bits. Ceci s'explique par le fait que les images récupérées par la caméra sont en couleurs et que chaque canal de couleur est codé sur 8 bits, ce qui implique que chaque pixel a en réalité 3 valeurs entre 0 et 255, à savoir une valeur pour chaque canal Rouge Vert Bleu (RVB).

Cet étalement des valeurs sur chaque canal RVB pour un pixel permet de maximiser le pourcentage d'obtention d'une représentation plus fidèle des couleurs de l'objet observé. En théorie, la valeur maximale d'un pixel pourrait donc être de  $255 + 255 + 255$  soit 765, ce qui est une valeur trop élevée pour que l'information soit codée sur 9 bits ( $2^9 = 512$ ).

Savoir que les couleurs restituées par la caméra sont très proches de la réalité est un atout non négligeable dans le cadre d'une application industrielle car cela peut permettre de faciliter les séparations de l'image en différentes zones si l'on souhaite étudier une partie spécifique de l'image capturée, ce qui est notre cas ici. De plus, cela peut également faciliter la reconstruction de la texture de l'objet observé selon l'objectif visé.

Toutefois, l'Indice de Protection (IP) de cette caméra n'est pas très élevé. En effet, le 3 signifie que le boîtier est protégé des outils et des fils de plus de 2,5 millimètres, et le 0 signifie qu'il n'est pas du tout résistant à l'eau. Son utilisation dans un lieu tel qu'un entrepôt ne serait pas sans risques car selon le type de ligne de production il peut y avoir des projection de poussières ou bien d'eau en fonction des types de produits fabriqués.

## 4.2 Laser

Afin de récupérer le profil de la tôle, j'ai utilisé un laser *LTPRHP3W* [7] de couleur verte, fabriqué par *Opto Engineering* (voir figure 4.2.1). D'après le fabricant, cette gamme de laser est idéale pour effectuer du contrôle qualité et de la reconstruction 3D. Pour confirmer cela nous allons une fois de plus nous pencher sur les caractéristiques techniques de ce dernier (voir tableau 4.2.1).



FIGURE 4.2.1 – Modèle de laser utilisé

Tension d'alimentation	12-24 V
Consommation d'énergie	4.5 W/h
Eclairement	30 klux
Mean Time Between Failures	environ 100 000 h
Température de fonctionnement	0-40 °C
Utilisation	Intérieur uniquement

TABLE 4.2.1 – Caractéristiques techniques du laser

D'après ce que l'on peut voir dans les caractéristiques techniques le laser peut être alimenté en 12 ou 24 Volts. C'est intéressant car cela permet d'ajuster la portée d'émission du laser, mais dans le cadre d'un contrôle qualité on pourrait supposer que ce dernier se trouve assez proche de l'objet à observer. Sa consommation d'énergie est assez faible, ce qui peut être intéressant dans le cadre d'une application industrielle car cela induit donc un coût assez limité à utiliser cet outil pour faire de l'inspection de pièces.

De plus, cette inspection pourrait également aider une entreprise à limiter les coûts dûs à la production de pièces défectueuses. En ce sens le coût d'investissement dans une technologie comme celle-ci semble assez faible par rapport à l'amélioration que cela peut apporter.

En effet l'appareil est plutôt robuste puisque le temps moyen entre deux pannes est d'environ 100 000 h, et on pourrait envisager de l'utiliser dans des conditions particulières pour du contrôle qualité dans des entrepôts réfrigéré ou au contraire pourquoi pas dans des ateliers soumis à des températures très chaudes, puisque sa plage de fonctionnement le lui permet.

Enfin, même si son niveau d'éclairement est plutôt élevé (on peut comparer avec le soleil qui lui a un niveau d'éclairement entre 50 et 100 klux [8]), le fabricant précise que ce projecteur n'est fait pour être utilisé qu'en intérieur, ce qui réduit son champ d'utilisation pour des applications d'inspection.

### 4.3 Objectif

La caméra comme le laser utilisés étaient tous deux munis du même objectif *HF9HA-1B* [9] (voir figure 4.3.1) de marque *Fujifilm*. Cet objectif étant choisis pour être utilisé avec notre caméra et notre laser, ses caractéristiques techniques (voir tableau 4.3.1) sont en accord avec les conclusions auxquelles nous avons abouti précédemment.



FIGURE 4.3.1 – Modèle d'objectif utilisé

Distance focale	de 1 à 9 mm
Taille max de capteur supportée	2/3"
Ouverture	de f/1.4 à f/16
Distance min à l'objet	0.1 m
Température d'utilisation	de -10 à 50 °C

TABLE 4.3.1 – Caractéristiques techniques de l'objectif

Pour compléter l'explication sur le choix d'utilisation de cet objectif nous pouvons nous pencher sur sa plage de température d'utilisation, qui est encore une fois compatible avec des conditions limites d'exploitation dans un entrepôt. On peut également noter une grande plage d'ouverture du diaphragme, ce qui permet de filtrer la lumière captée par le capteur optique. Ici, cela nous sera très utile pour limiter la quantité de lumière naturelle capturée pour se concentrer sur la lumière émise par le faisceau laser sur l'objet.

De plus, la distance minimale qui nous est permise avec cet objectif est très petite, ce qui en fait un très bon candidat pour une utilisation dans le cadre d'une inspection qualité. En effet, l'inspection visuelle peut nécessiter que la caméra soit située très proche de l'objet observé, ce qui est possible si l'on utilise cet objectif.

#### 4.4 Robot *Keller Und Knappich Augsburg (KUKA)*

En dernier lieu, nous allons discuter du système que nous avons utilisé pour mettre en place notre solution de scanner 3D, à savoir un robot *KR 3 R540* [10] de marque *KUKA* (voir photo 4.4.1).



FIGURE 4.4.1 – Modèle de robot utilisé

Ce robot présente des caractéristiques intéressantes que nous allons présenter dans le tableau 4.4.1, mais nous verrons qu'il possède également certaines limites quand à une utilisation dans un cadre industriel.

Charge utile max	3 kg
Nombres d'axes	6
Répétabilité de pose	0.02 mm
Température de fonctionnement	de 5 à 45 °C
Indice de protection	IP40

TABLE 4.4.1 – Caractéristiques techniques du robot

La charge utile maximale supportée par le robot est plus que suffisante pour mettre en place notre dispositif de contrôle sur le bras du robot, ce qui nous assure une fiabilité du système pour obtenir des images de bonnes qualités. De plus, son nombre d'axes ainsi que sa répétabilité de pose nous permettra de déplacer le robot de manière précise tout en ayant un positionnement optimal de la caméra par rapport à l'objet, comme on peut le voir en figure 4.4.2.

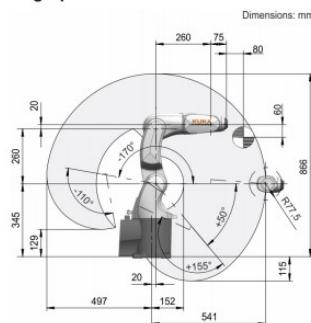


FIGURE 4.4.2 – Dimensions et champ d'action du robot

Encore une fois, la température de fonctionnement permet d'envisager son utilisation dans des conditions limites, bien que la tolérance au froid soit légèrement réduite par rapport aux autres composants utilisés dans le projet. Toutefois, même si l'indice de protection est ici quelque peu supérieur à celui de la caméra, il n'est pas encore très élevé.

## 5 Réalisation du Scanner

Maintenant que nous avons réalisé l'état de l'art concernant les différentes méthodes permettant de faire de la reconstruction 3D et que nous avons présenté le matériel utilisé pour réaliser notre système, nous allons aborder la méthode de réalisation de celui-ci.

### 5.1 Mise en place du dispositif d'acquisition

Pour réaliser le dispositif d'acquisition j'ai commencé par mettre en place un profilé en aluminium mesurant 50 cm de long au bout du bras du robot. Cette tige a été placée de sorte à être parallèle au plan sur lequel est disposée notre tôle.

Une fois cette tige fixée, j'ai cherché à positionner la caméra et le laser sur cette dernière de sorte à ce que l'on puisse observer la moitié de la tôle dans le champ de vision de la caméra, tout en faisant en positionnant le laser verticalement par rapport au plan. A partir de cette étape notre système était en place, et se présentait comme en figure 5.1.1.



FIGURE 5.1.1 – Dispositif d'acquisition des images

Toutefois, au vu du système de fixation de la caméra, celle-ci récupère donc une image tournée de 90° (voir figure 5.1.2). Cela ne pose pas de problème en soit pour le travail de reconstruction 3D, mais cela rend moins aisés l'ajustement de la position de celle-ci de sorte à avoir le meilleur angle de vu possible de l'objet.



FIGURE 5.1.2 – Capture d'une image de la tôle avec notre dispositif

Une fois la caméra et le laser ajustés de manière optimale, j'ai dû déterminer précisément l'angle de la caméra par rapport à la tôle et la distance entre le centre optique de la caméra et cette dernière. Pour expliquer notre démarche à ce stade j'ai réalisé les schémas disponibles en figure 5.1.3 ci-dessous.

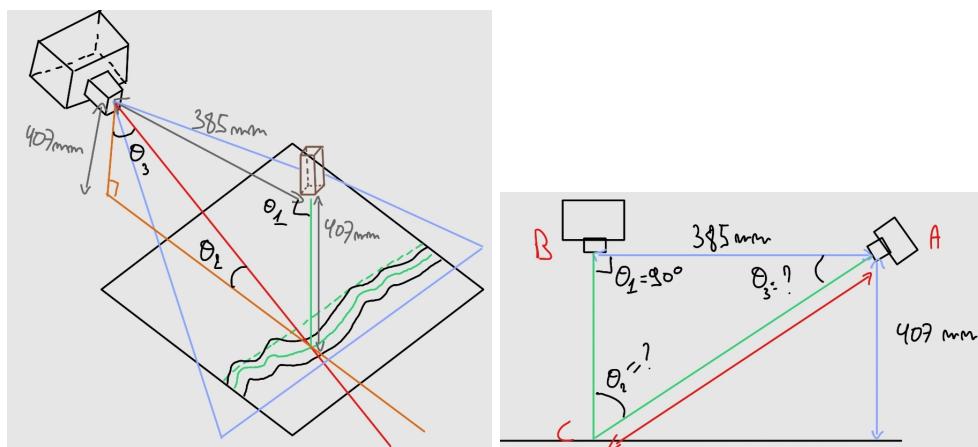


FIGURE 5.1.3 – Schémas du montage en perspective (à gauche) et vu de côté (à droite)

Pour expliquer le schéma de gauche brièvement, la ligne rouge représente la lumière captée par le centre optique de la caméra issue de la tôle observée. Le triangle bleu correspond quand à lui au champ de vision de la caméra. Enfin, les lignes vertes correspondent au faisceau laser projeté sur la tôle ainsi que sa répartition sur celle-ci.

Dans le second schéma, la distance  $AB$  correspond à l'écartement entre la caméra et le laser utilisés sur notre profilé, et la distance  $AC$  correspond à la hauteur à laquelle se trouve notre profilé par rapport au plan sur lequel est située notre tôle.

Avec le système mis en place je connaissais donc les données suivantes :

- Le centre optique du laser et de la caméra appartiennent à une même droite  $AB$  parallèle au plan sur lequel est disposée la tôle
- Distance entre ces deux plans : 407 mm
- Distance laser-caméra : 385 mm
- Angle entre le faisceau laser et la droite  $AB$  :  $90^\circ$

A partir de ces données, j'ai pu établir avec exactitude la distance entre le centre optique de la caméra et la tôle en utilisant le théorème de Pythagore :

$$AC = \sqrt{AB^2 + BC^2} = \sqrt{385^2 + 407^2} = 560.245\text{mm} \quad (2)$$

Dans un second temps, j'ai pu déterminer les angles  $\theta_2$  et  $\theta_3$  en utilisant la règle de trigonométrie pour calculer une tangente (voir équation 3) et la règle selon laquelle la somme des angles d'un triangle est toujours égale à  $180^\circ$ .

$$\tan(\theta_3) = \frac{\text{côté opposé à } \hat{A}}{\text{côté adjacent à } \hat{A}} = \frac{BC}{AB} = \frac{407}{385} = 1.05714 \rightarrow \theta_3 = 46.5911^\circ \quad (3)$$

$$\theta_2 = 180^\circ - \theta_1 - \theta_3 = 180^\circ - 90^\circ - 46.5911^\circ = 43.4089^\circ \quad (4)$$

Ces calculs ont été effectué dès le départ car ces valeurs ont un impact sur la fidélité du modèle 3D obtenu et doivent être prises en compte dans l'implémentation du scanner pour obtenir une reproduction optimale du modèle réel.

## 5.2 Étalonnage

Avant d'appliquer mon système pour réaliser le scan de la tôle, j'ai réalisé un étalonnage en capturant 2 images (voir figure 5.2.1). L'image de gauche a été prise avec le faisceau laser projeté directement sur le plan sur lequel est posée la tôle, et celle de droite a été prise avec le faisceau laser projeté sur un livre de 20 mm d'épaisseur, posé lui aussi sur le plan dans lequel est placée la tôle.

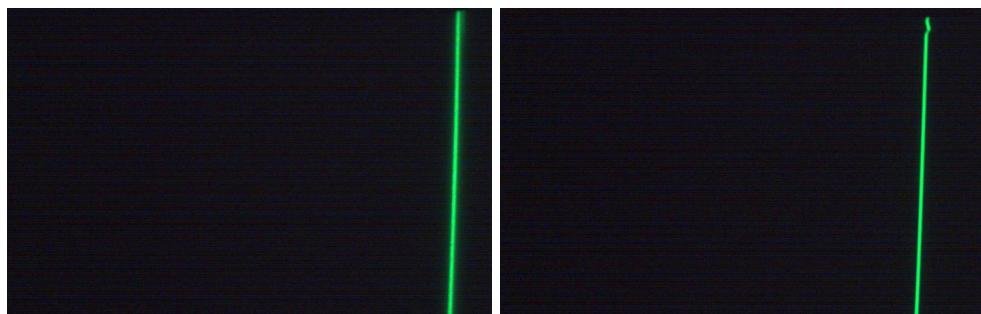


FIGURE 5.2.1 – Images d'étalonnage du système

Cet étalonnage a été effectué afin d'établir une correspondance pixels/millimètres entre les images capturées et l'objet réel que l'on souhaite reproduire. Pour faire cela j'ai codé une fonction à l'aide du logiciel *MATLAB*, pour extraire les centroïdes de la région de chacune des deux images qui contenait la ligne laser puis calculer la distance euclidienne entre ces deux centroïdes.

Avant d'expliquer le contenu de la fonction codée pour obtenir cette distance et établir la correspondance pixels/millimètres, je vais définir ce qu'est un centroïde. Mathématiquement, un centroïde correspond au point pour lequel toutes les diagonales d'un polygone se croisent [11]. Physiquement, cela correspond au centre de gravité d'un objet.

Dans mon cas, les régions des deux images contenant les lignes du faisceau laser pouvant être assimilées à des rectangles, leurs centroïdes respectifs sont donc les deux points pour lesquels les diagonales de chaque rectangle se croisent. Ceci a été représenté dans la figure ci-dessous (voir 5.2.2).

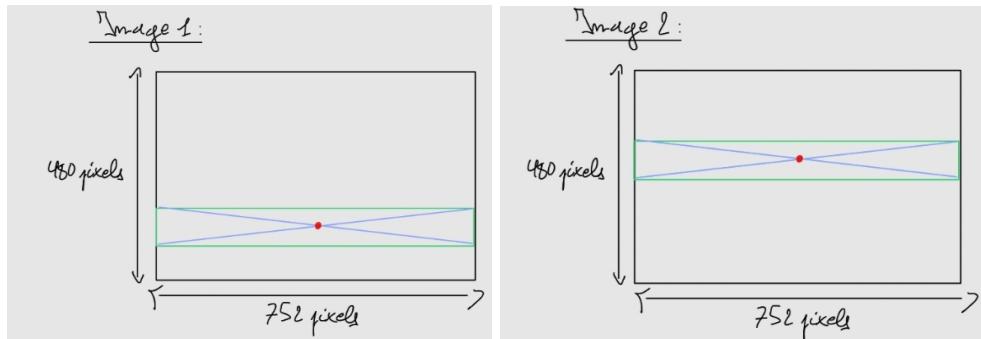


FIGURE 5.2.2 – Centroïdes des lignes de laser dans les images étalons

Le schéma de gauche ci-dessus correspond à la ligne du faisceau laser prise directement dans le plan sur lequel repose la tôle, celui de droite correspond à la ligne du faisceau laser lorsqu'on pose le livre de 20 mm d'épaisseur sur le plan initial. Comme nous pouvions le voir en figure 5.2.1, les lignes de laser ne sont pas positionnées au même endroit dans les deux images. Ceci se traduit donc par 2 centroïdes différents, un pour chacune des deux régions.

On peut ici assurer que la coordonnée  $u$  (voir figure 2.3.2 pour le positionnement des axes  $u$  et  $v$ ) de chaque centroïde est identique, puisque le champ de vision de notre caméra reste identique entre 2 acquisitions. Par conséquent, seule la coordonnée  $v$  des deux centroïdes est différente, ce qui nous permet de calculer la distance Euclidienne entre ces derniers.

Ainsi, le principe de la fonction permettant de déterminer cette distance est expliqué dans la figure 5.2.3 ci-dessous.



FIGURE 5.2.3 – Schéma d'établissement de la distance en pixels entre 2 lignes de laser

La binarisation des images effectuées ici avant l'extraction des valeurs des centroïdes permet d'isoler les régions contenant le faisceau laser dans chacune des deux images, en associant à chacun des pixels de cette région la valeur 1 ce qui le colore en blanc, et en donnant la valeur 0 à tous les autres pixels pour les colorer en noir.

### 5.3 Paramètres d'acquisition

Une fois ces calculs préliminaires réalisés, j'ai fixé les paramètres qui me permettraient d'acquérir les meilleures images possibles tout en ayant un nombre suffisamment conséquent pour pouvoir reproduire le profil de la tôle sur toute sa longueur :

- Avancement du robot de manière linéaire selon de pas de 5mm
- Minimum de luminosité possible issue d'un environnement extérieur
- Diaphragme de l'objectif de la caméra réglé de sorte à laisser entrer un minimum de lumière tout en faisant en sorte de bien voir la ligne de laser dans l'image
- Objectif du laser réglé de sorte à avoir le faisceau le plus concentré et le plus lumineux possible

Ces paramètres m'ont permis d'acquérir 63 images de la tôle, chacune distantes de 5 mm ce qui permettait de balayer toute la tôle à l'aide du faisceau laser. Les conditions en lien avec la luminosité me permettaient de faire ressortir suffisamment le laser dans mes images. Ce dernier point était la principale problématique afin d'obtenir une représentation fidèle de la tôle.

### 5.4 Utilisation du système

Une fois les calculs préliminaires faits, l'étalonnage du système réalisé, les conditions d'acquisitions définies et l'acquisition de mes 63 images terminée, j'ai pu passer à l'implémentation du script *MATLAB* permettant d'atteindre l'objectif principal, à savoir la reconstruction du profil de la tôle dans un nuage de points 3D.

#### 5.4.1 Traitement des images capturées

Pour maximiser les chances d'une reproduction fidèle du profil au sein du nuage de points, j'ai appliqué une série de traitement sur la totalité des images afin de faire en sorte que la ligne du faisceau laser soit la plus exploitable possible. Cette série de traitement est résumée dans la figure 5.4.1.1 et je vais détailler ci-après les choix faits pour les traitements appliquer, tout en les nuançant.

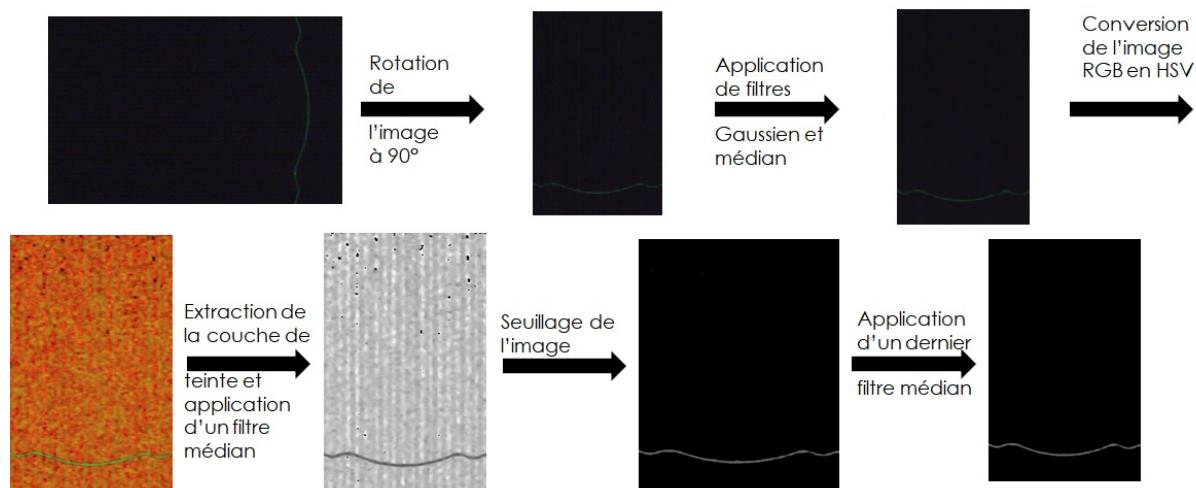


FIGURE 5.4.1.1 – Présentation des traitements appliqués aux images capturées

L'application d'une rotation sur les images n'était pas obligatoire, mais me facilitait personnellement la tâche de visualisation lorsque je voulais effectuer une comparaison entre une images capturées et le positionnement du laser sur la tôle directement.

L'application d'une suite de filtres Gaussien et Médian comme effectuée dans mon cas n'est pas la méthode la plus optimale car bien que ces filtres présentent les avantages suivants à savoir :

- Lisser l'image pour le filtre Gaussien si  $\sigma < 1$
- Réduire le bruit pour le filtre Médian

Elle présente aussi un inconvénient énorme que j'ai oublié de prendre en compte lors de ma réalisation : Si visuellement j'avais l'impression que ces filtres me permettaient d'avoir un faisceau laser mieux défini dans mes images, ils altéraient en réalité considérablement la qualité de ce dernier. Par conséquent le choix que j'ai effectué ici est plus que critiquable.

La conversion des images capturées du RGB vers le codage Hue Saturation Value (HSV) m'a permis d'extraire par la suite la couche de teinte (H) dans toutes les images, ce qui me permettait de mettre en valeur le faisceau laser dans celles-ci, et me rendait plus aisément le seuillage effectué par la suite pour isoler les différents faisceau capturés.

#### 5.4.2 Extraction des coordonnées du faisceau laser

Une fois le faisceau laser isolé dans les différentes images, il restait la partie la plus importante afin de pouvoir effectuer la reconstruction : l'extraction des coordonnées des pixels correspondants au faisceau dans les images. Pour faire cela j'ai inséré dans mon script *MATLAB* une portion de code correspondant à l'algorigramme présenté ci-dessous.

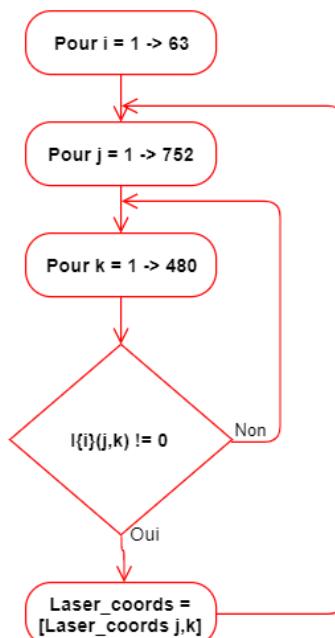


FIGURE 5.4.2.1 – Algorigramme d'extraction des coordonnées du laser dans les images

### 5.4.3 Crédation du nuage de points

Une fois les coordonnées du laser extraites, il fallait modéliser le nuage de points 3D en rajoutant aux coordonnées récupérées la troisième dimension. Pour cela j'ai effectué un décalage de 5 de chaque ligne de laser par rapport à la ligne précédente. Cette démarche est représentée par l'algorigramme présent dans la figure 5.4.3.1.

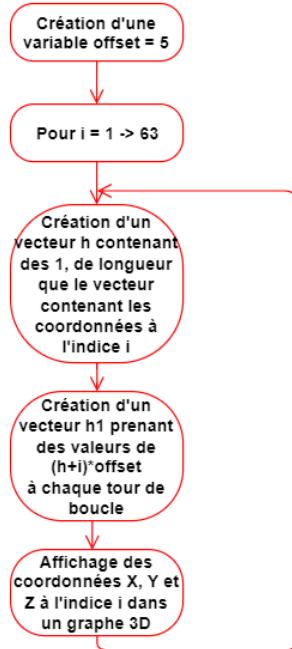


FIGURE 5.4.3.1 – Algorigramme de création du nuage de points 3D

En affichant ce nuage, je me suis rendu compte qu'il comportait une quantité importante de points aberrants comme on peut le voir en figure 5.4.3.3.

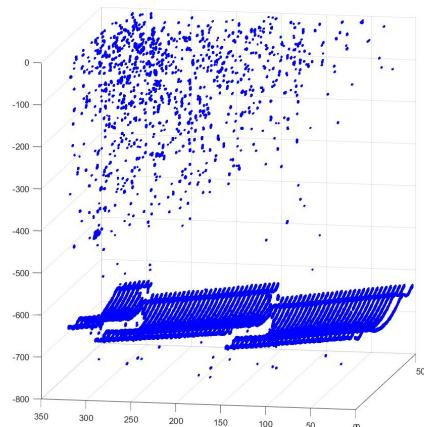


FIGURE 5.4.3.2 – Nuage de points 3D obtenu sans filtre

Même si le profil de la tôle est bien reconstruit ici, il fallait supprimer ces points, j'ai pour cela effectué une remise à l'échelle du nuage suivant l'axe Z, ce qui m'a donné le résultat suivant.

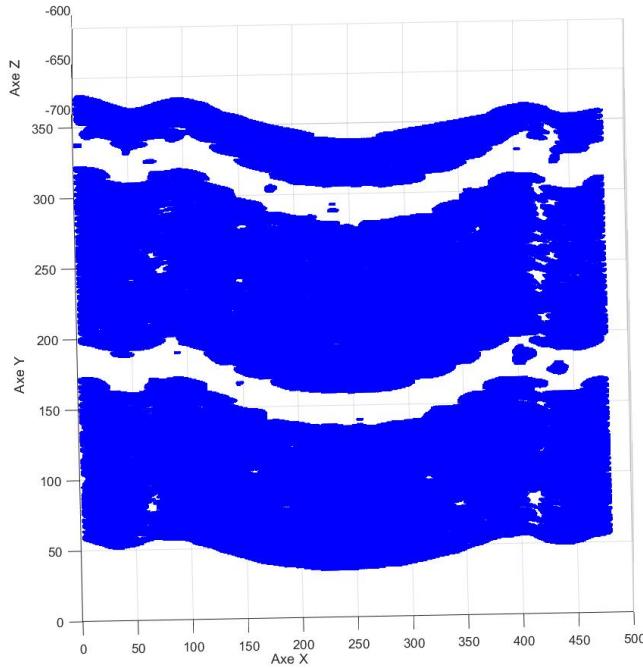


FIGURE 5.4.3.3 – Nuage de points 3D obtenu après filtrage

Même si ce résultat est mieux, il n'est pas encore parfait car on peut voir des trous au milieu de la reconstruction. De plus, l'angle de vue de la caméra par rapport à la tôle, et la correspondance pixels/millimètres effectuée lors des calculs préliminaires n'étaient pas pris en compte.

J'ai donc effectué une remise à l'échelle des points en utilisant la correspondance déterminée précédemment à savoir le fait qu'une distance de 20 mm sur notre tôle est égale à une distance de 40.0246 pixels dans nos images. J'ai donc multiplié chacune des coordonnées X, Y et Z de tous les points récupérés par la valeur  $\frac{20}{40.0246}$ , ce qui a divisé par environ 2 l'échelle d'affichage du nuage de points (voir figure 5.4.3.4).

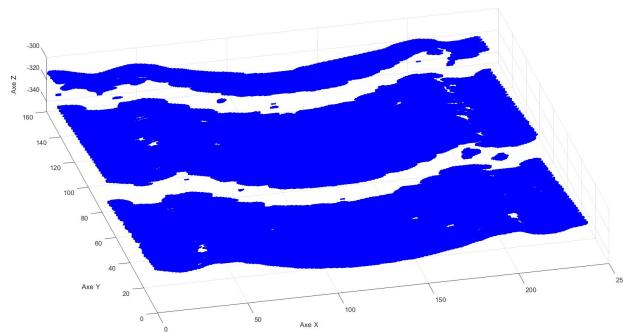


FIGURE 5.4.3.4 – Nuage de points 3D obtenu après remise à l'échelle

#### 5.4.4 Import du nuage de points sur *Catia*

A ce stade là, notre nuage de points prend en compte l'étalonnage effectué, j'ai donc effectué une sauvegarde de tous les points récupérés dans un fichier texte pour pouvoir importer le nuage de points sur *Catia*.

Pour importer un nuage de points sur Catia, il faut suivre la démarche suivante :

##### Étape 1 : Conversion du fichier texte au format American Standard Code for Information Interchange (ASCII)

Ouvrir le fichier texte sauvegardé dans un bloc note, faire "*enregistrer sous*" (*Ctrl + Maj + S*) puis rajouter l'extension ".asc" au nom du fichier.

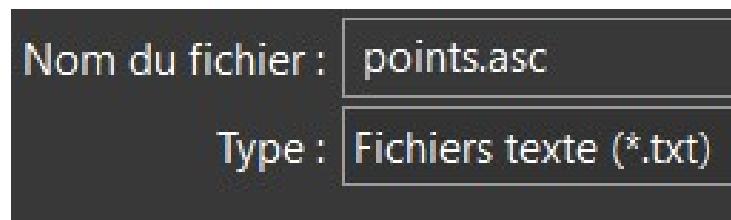


FIGURE 5.4.4.1 – Conversion du fichier texte au format ASCII

##### Étape 2 : Ouverture de l'atelier *Digitized Shape Editor* (DSE) sur *Catia*

Créer une nouvelle *Part* à partir du menu *Forme* → *DSE*.

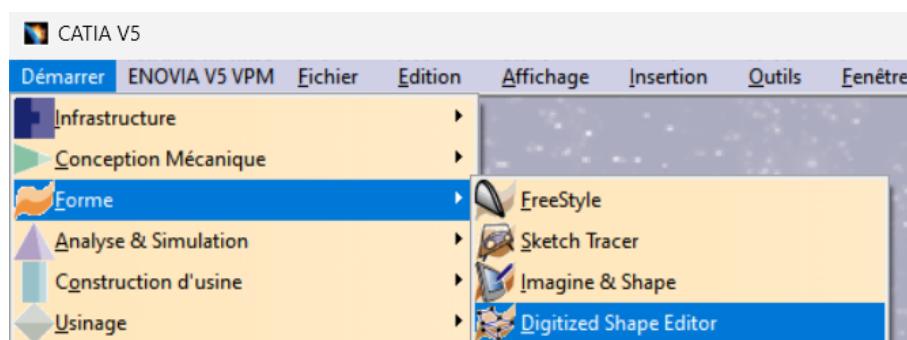


FIGURE 5.4.4.2 – Ouverture de l'atelier *DSE*

### Étape 3 : Importation du fichier contenant les points

Aller récupérer le fichier ASCII dans le répertoire où il a été enregistré, puis appuyer sur *Appliquer*.

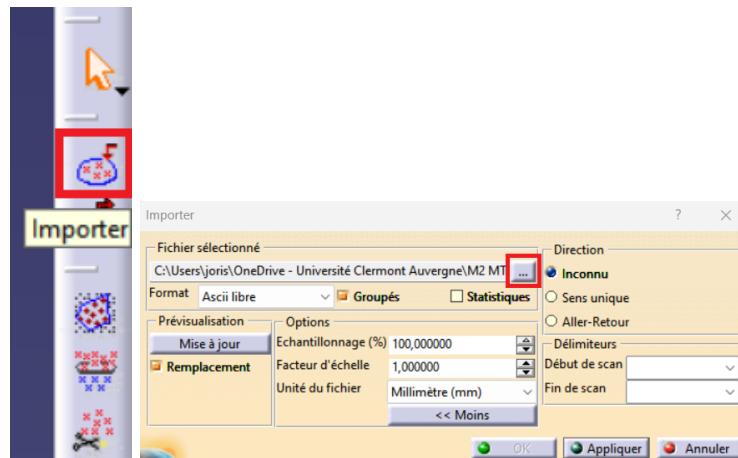


FIGURE 5.4.4.3 – Import du fichier ASCII sur *Catia*

### Étape 4 : Visualisation du nuage de points créé

Une fois tout cela fait, il est possible d'observer le nuage de points sur *Catia*.

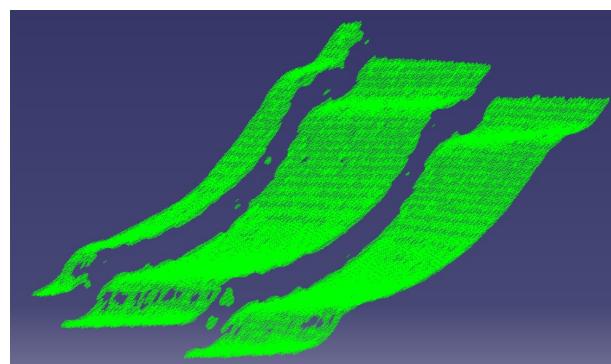


FIGURE 5.4.4.4 – Visualisation du nuage de points sur *Catia*

## 6 Axes d'amélioration

### 6.1 Automatisation du processus d'acquisition

À l'heure actuelle, le système est manuel car les déplacements du robot, l'acquisition d'images tous les 5 mm et le lancement du processus de création du nuage de points 3D ne sont pas automatisés.

En effet, je n'ai pas réalisé la programmation du robot afin d'automatiser le déplacement de celui-ci. De plus, je ne me suis pas penché sur la réalisation d'une acquisition automatique des images à l'aide du logiciel *uEye Cockpit*. Enfin, le processus actuel de création du nuage de points 3D nécessite l'exécution d'un script *MATLAB*, ce qui nécessite également l'intervention d'une personne pour obtenir la reconstruction de la tôle.

Néanmoins, l'objectif de ce premier prototype était principalement d'arriver à obtenir une reproduction fidèle de la tôle. L'automatisation de tout ce processus dans un objectif de réalisation d'un contrôle qualité utilisable en industrie est l'étape suivante.

### 6.2 Optimisation de la partie software

Le code produit n'est pas utilisable en l'état pour une application industrielle car le temps d'exécution du programme est trop long. Par conséquent il faudrait trouver un moyen d'optimiser le temps de calcul de ce dernier pour arriver à quelque chose de l'ordre de quelques secondes ou bien d'une minute. Cela pourrait notamment passer par une diminution du nombre de points enregistrés pour la reconstruction et l'utilisation d'une méthode d'optimisation par *B-Splines* pour faire fitter les points conservés avec le profil de la tôle.

De plus, certains paramètres n'ont pas été pris en compte ici par manque de temps, comme l'angle d'inclinaison de la caméra par rapport à l'objet ou encore la distorsion induite par la caméra lors de la capture des images.

### 6.3 Établissement d'un benchmark pour valider les résultats obtenus

Le nuage de points obtenu semble cohérent par rapport à la tôle réelle car on perçoit bien l'inclinaison de celle-ci sur toute sa longueur. On peut également noter que les sommets et les creux reproduits paraissent être en accord avec ceux existants sur cette dernière.

Toutefois, aucune comparaison entre la reproduction et la tôle physique ne permet aujourd'hui d'affirmer que le nuage de points correspond à 100% à celle-ci. Cela pose donc un problème quand à la validation des résultats obtenus dans notre cas. Il aurait fallu réaliser le scan d'un objet simple comme un livre par exemple avant de réaliser celui de la tôle pour pouvoir affirmer la justesse des résultats.

### 6.4 Utilisation d'une méthode de reconstruction

Après avoir effectué ce benchmark, il serait également possible d'envisager d'utiliser une méthode de reconstruction par vision stéréoscopique avec 2 caméras calibrées pour établir un autre nuage de points de la tôle et le comparer avec celui obtenu ici. On pourrait ainsi étudier les similarités et les différences entre les deux résultats et pouvoir sélectionner la méthode la plus performante dans le cadre d'une utilisation pour faire du contrôle qualité.

## 7 Conclusion

J'ai eu la chance de mener au cours de ce projet un travail très enrichissant et stimulant, comprenant à la fois un fort aspect technique, de la documentation afin de bien comprendre comment fonctionne la reconstruction 3D par triangulation laser et de la réflexion pour adapter son utilisation à une application de contrôle qualité dans un cadre industriel.

Ainsi, j'ai pu mieux comprendre les notions étudiées dans le cadre du cours d'Image - vision mais également me rendre compte des enjeux de la mise en place d'un contrôle qualité sur une ligne de production.

Au-delà de ces notions, cela a également appuyé le fait qu'il faut toujours prévoir une marge de manœuvre lors de la réalisation d'un projet et qu'une organisation bien définie des tâches à réaliser permet de gagner énormément de temps durant celui-ci. Ce temps supplémentaire peut permettre de compenser le fait que certaines tâches peuvent s'avérer plus longues que ce que l'on avait imaginé au départ.

En effet, même si les résultats actuels ne peuvent pas être utilisés en l'état, le travail effectué ici permet de poser une base à la construction d'un prototype viable par la ou les personnes qui reprendront ce projet dans le futur.

En conclusion ce projet m'a appris beaucoup quand à mes forces et mes faiblesses aussi bien sur le cadre professionnel que personnel, ce qui me servira sans aucun doutes dans le futur dans le cadre de mon métier.

## Bibliographie

- [1] P. Brandauer & S. Jasonarson & R. Jöchl & P. MAYER. *3D reconstruction from 2D images*. 2019. URL : [https://www.cosy.sbg.ac.at/~held/teaching/wiss\\_arbeiten/slides\\_18-19/3Drecon.pdf](https://www.cosy.sbg.ac.at/~held/teaching/wiss_arbeiten/slides_18-19/3Drecon.pdf).
- [2] *Géométrie épipolaire*. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9om%C3%A9trie\\_%C3%A9pipolaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9om%C3%A9trie_%C3%A9pipolaire).
- [3] Clément VALENTE. *Scanner 3D à lumière structurée*. 2019. URL : <https://numerisation3d.construction/scanner-3d-lumiere-structuree/?v=11aedd0e4327>.
- [4] MPASHAEI. *Structured Light Scanner*. 2020. URL : <https://github.com/MPashaei/Structured-Light-Scanner/blob/master/Images/Object%20Coding%20and%5C%20Scanning.png>.
- [5] Rémi SLYSZ. « Reconstruction de surface 3D d'objets vivants ». 2014.
- [6] Imaging Development SYSTEMS. *UI-1225-LE-C-HQ*.
- [7] *LTPRHP3W*. URL : <https://www.opto-e.com/en/products/ltprhs3w-series/LTPRHP3W-G>.
- [8] *LUMIÈRE ET RAYONNEMENT LUMINEUX*. URL : <https://moineau-instruments.com/content/23-lumiere-et-rayonnement-lumineux>.
- [9] *HF9HA-1B*. URL : <https://www.fujifilm.com/fr/fr/business/optical-devices/mvlens/hfha>.
- [10] *KR 3 R540*. URL : [https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000270971\\_en.pdf](https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000270971_en.pdf).
- [11] URL : <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/centroide>.