

République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen
Faculté des Sciences
Département d'Informatique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique

Option : RÉSEAUX Et SYSTÈMES DISTRIBUÉ (R.S.D)

Thème

Numérisation 3D pour la construction d'attelles médicales

Réalisé par :

- BARCA Abdelkrim
- BELGAID Zakarya

Présenté le 04 juillet 2022 devant le jury composé de MM.

- *Mr. BELHOCINE* (Président)
- *Mme. SELADJI YASSAMINE* (Encadreur)
- *Mr. SOULIMANE SOFIANE* (Co-Encadreur)
- *Mme. BELHABI* (Examineur)

Année universitaire : 2021-2022

Remerciements...

Tout d'abord, nous levons les mains bien haut vers le ciel, remerciant **ALLAH** Tout-Puissant, qui nous a donné force et santé pour mener à bien ce travail.

On souhaite avant tout remercier mon co-encadreur de mémoire **Monsieur SOULIMANE SOFIANE**, pour le temps qu'il a consacré à nous apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence nous a grandement stimulé.

On tient à témoigner toute notre reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Mme SELADJI YASSAMINE qui nous a beaucoup appris sur les défis à relever dans le monde d'informatique. Elle a partagé ses connaissances et expériences dans ce milieu, tout en nous accordant sa confiance et une large indépendance dans l'exécution de nos missions lors du projet.

Un autre remerciement au comité des jurys pour avoir accepté de présider et d'examiner notre projet de fin d'étude, sans oublier la famille, les parents et amis qui étaient et sont toujours un atout moral pour nous.

DEDICACES

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A ma petite famille

Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail, ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A mes amis BENLALDJ OTMANE et BENLALDJ ZAKARIA

Merci pour votre soutien dans mon mémoire

A ma famille, mes proches et a tous ceux qui me donnent de l'amour et de la force .

Résumé

Les technologies numériques dans le traitement d'images 2D en les transformant en image 3D a été beaucoup utilisé pour la gestion des informations collectées pour des études pluridisciplinaires. Ces outils commencent à s'affirmer comme des supports privilégiés pour la description, l'analyse et la compréhension des objets d'étude. La description des objets doit donc pouvoir s'appuyer sur un support de représentation plus sophistiqué que seulement des images ou seulement des modèles 3D en explicitant, d'une part, la complexité morphologique de l'objet et en reflétant, d'autre part, les différents aspects véhiculés par les acquisitions d'imagerie. Dans ce projet, nous avons développé deux méthodes de création d'image 3D à partir de la photogrammétrie et de capteur LiDAR. Nous avons appliqué ces numérisations 3D pour la création de solutions orthopédiques sur mesure.

Abstract

Digital technologies in the processing of 2D images by transforming them into 3D images have been widely used for the management of information collected for multidisciplinary studies. These tools are beginning to assert themselves as privileged supports for the description, analysis and understanding of the objects of study. The description of the objects must therefore be able to rely on a more sophisticated representation support than only images or only 3D models by explaining, on the one hand, the morphological complexity of the object and by reflecting, on the other hand, the different aspects conveyed by the imaging acquisitions. In this project, we have developed two methods of 3D image creation from photogrammetry and LiDAR sensor. We applied these 3D scans for the creation of custom-made orthopedic solutions.

ملخص

تم استخدام التقنيات الرقمية في معالجة الصور ثنائية الأبعاد عن طريق تحويلها إلى صور ثلاثية الأبعاد على نطاق واسع لإدارة المعلومات التي تم جمعها للدراسات متعددة التخصصات. بدأت هذه الأدوات في تأكيد نفسها كدعم متميز لوصف وتحليل وفهم كائنات الدراسة. لذلك يجب أن يكون وصف الكائنات قادرًا على الاعتماد على دعم تمثيل أكثر تعقيدًا من الصور فقط أو النماذج ثلاثية الأبعاد فقط من خلال شرح التعقيد المورفولوجي للكائن من ناحية ومن خلال عكس الجوانب المختلفة من ناحية أخرى نقلتها عمليات الاستحواذ التصوير. في هذا المشروع ، قمنا بتطوير طريقتين لإنشاء الصور طبقنا هذه الفحوصات ثلاثية الأبعاد لإنشاء حلول تقويم العظام . LiDAR ثلاثية الأبعاد من المسح التصويري ومستشعر

حسب الطلب

Table de matières

	Introduction générale	1
I	Quel système doit-on utiliser pour l'acquisition 3D ?	
	I.1 Acquisition passive.....	5
	I.1.1 Shape from X.....	6
	I.1.2 La photogrammétrie	6
	I.1.3 Application de la Photogrammétrie.....	8
	I.1.3.1 La cartographie et l'archéologie.....	8
	I.1.3.2 Modélisation photo / modélisation basée sur l'image..	9
	I.1.3.3 La numérisation 3D	10
	I.2 Acquisition active.....	11
	I.2.1 Triangulation par point laser	11
	I.2.2 Lumière structurée.....	11
	I.2.3 Temps de vol.....	11
	I.2.3.1 LA TECHNOLOGIE LiDAR.....	12
	I.2.3.2 Applications du LiDAR.....	12
	I.2.3.3 Modélisation des mesures LiDAR	12
	I.3 Conclusion.....	16
II	Quel prototype de numérisation ?	
	II.1 Introduction.....	19
	II.2 Composant électroniques utilisés.....	20
	II.2.1 Contrôleur électronique.....	20
	II.2.2 Les modules et moteurs utilisés.....	24
	II.2.3 Capteurs pour numérisation.....	25
	II.3 Réalisation des scanners.....	25
	II.3.1 Scanner photogrammétrie	25
	II.3.2 Scanner LiDAR.....	28
	II.4 Logiciels d'acquisition numérique 3D.....	32
	II.4.1 Meshlab.....	32

II.4.2	Blender.....	33
II.4.3	Meshroom.....	33
II.5	Conclusion.....	33
III	Appareillage orthopédique sur mesure par la numérisation 3D	
III.1.	Introduction.....	36
III.2.	Méthodologie.....	37
III. 3.	Impression 3D.....	38
III.4	Test des prototypes.....	39
III.4.1	Scan par le prototype de photogrammétrie	39
III.4.2	Scan par le prototype LiDAR.....	42
III.5	Comparaison entre scan 3D photogrammétrie et LiDAR.....	43
III.6	Conclusion.....	43

Chapitre I Quel système doit-on utiliser pour l'acquisition 3D ?

Figure I.1	Classification des systèmes d'acquisition 3D	5
Figure I.2	Perspective de la vision humaine.....	7
Figure I.3	La photographie Nadar.....	7
Figure I.4	Différentes méthodes de mesures de longueurs.....	8
Figure I.5	Procédés utilisés pour le traitement sur les images.....	9
Figure I.6	Image Modeler : Images source, points et Géométrie saisie manuellement avec rendu des couleurs.....	10
Figure I.7	Zone géographique scannée par la technologie LiDAR.....	13
Figure I.8	Principe de localisation des objets par la technologie LiDAR.....	13
Figure I.9	Scène scannée par la technologie LiDAR.....	14
Figure I.10	Comparaison entre un scan normal et un scan avec LiDAR technologie...	14

Chapitre II Quel prototype de numérisation ?

Figure II.1	Description de la carte Arduino UNO.....	22
Figure II.2	Les entre et sortie numérique de la carte Arduino UNO.....	23
Figure II.3	Moteur pas à pas avec son datasheet.....	24
Figure II.4	Shield pour Arduino UNO.....	24
Figure II.5	Capteur LiDAR.....	25
Figure II.6	Corps de base de notre scanner.....	26
Figure II.7	Intérieure de notre scanner.....	26
Figure II.8	La plateforme de rotation.....	27
Figure II.9	Le branchement du moteur avec le Shield et l'alimentation.....	27
Figure II.10	Base en bois de notre scanner LiDAR	29
Figure II.11	Prototype de scanner 3D LiDAR.....	30
Figure II.12	Branchements capteur LiDAR avec Arduino.....	31
Figure II.13	Mouvement des deux moteurs.....	31
Figure II.14	Les information collecter on format text	32

Chapitre III Appareillage orthopédique sur mesure par la numérisation 3D

Figure III.1	Différents types de corset de scoliose.....	37
Figure III.2	Corset de scoliose imprimé sur mesure par impression 3D.....	38
Figure III.3	Photos prise en rotation lors de scan par photogrammétrie.....	39
Figure III.4	L'insertion des images dans MESHROOM.....	40
Figure III.5	Nuage de points formé sur MESHROOM.....	40
Figure III.6	Résultats après polissage sur BLENDER.....	41
Figure III.7	Attelle après l'insertion de l'algorithme de VORONOI.....	41
Figure III.8	Attelle 3D subdivisé après impression 3D.....	41
Figure III.9	Mesures de nuage de points par le scan LiDAR.....	42
Figure III.10	Scan LiDAR d'un petit joué et imprimé en 3D.....	42

Liste des tableaux

Tableau II.1	Comparaison entre la carte Arduino et la carte Raspberry Pie	20
Tableau II.2	Constitution de la carte Arduino UNO.....	22
Tableau III.1	Comparaison entre le scanner LiDAR et PHOTOGRAMMÉTRIE.....	43

Acronymes et abréviations

COLLADA	Collaborative Design Activity
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
GPS	Global Positioning System
FLIGHT	Forest Light radiative transfer
GORT	Optique Géométrique et Transmission du Rayonnement
IRM	Imaging and Rapid-scanning Ion Mass
LiDAR	Light Detection and Ranging
L'INRIA	L'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
PWM	Pulse Width Modulation
PLY	Format de Fichier de Polygones
RLB	Rider Levett Bucknall
STL	Stéréolithographie
UV	Ultra Violet
VRML	Virtual Reality Modeling Language
3D	Three Dimensions

Introduction Générale

Les technologies numériques dans le traitement d'images 2D en les transformant en image 3D a été beaucoup utilisé pour la gestion des informations collectées pour des études pluridisciplinaires. Ces outils commencent à s'affirmer comme des supports privilégiés pour la description, l'analyse et la compréhension des objets d'étude. La description des objets doit donc pouvoir s'appuyer sur un support de représentation plus sophistiqué que seulement des images ou seulement des modèles 3D en explicitant, d'une part, la complexité morphologique de l'objet et en reflétant, d'autre part, les différents aspects véhiculés par les acquisitions d'imagerie. Dans ce projet, nous proposons de développer une méthode de création d'image virtuelle 3D à partir d'images de différentes positions synchronisées[1].

Les méthodes de numérisation et de reconstruction 3D ont notamment connu des évolutions importantes avec le développement des scanners laser 3D et de logiciels de reconstruction 3D à partir de différentes méthodes d'acquisition. Aujourd'hui le modèle 3D est à considérer comme le support graphique à privilégier pour différents domaines comme le patrimoine, la culture, la santé...

Ce projet est une contribution aux études de nombreuses données des objets 3D afin de créer de nouveaux modèles avec les différentes techniques disponibles actives ou passives. Nous avons développé deux méthodes de reconstruction 3D, une basée sur la méthode active LiDAR (*Light Detection and Ranging*) et un autre passive basée sur la photogrammétrie[2]. Cette dernière utilise le même principe que les yeux humains ou les vidéos 3D pour établir une perception de profondeur. Si les avancées récentes en matière de reconstruction 3D permettent d'obtenir des représentations graphiques métriquement précises et géométriquement et visuellement très détaillées, l'exploitation de ces nouvelles représentations au sein des méthodologies d'étude et des modes opératoires propres aux méthodes est encore d'actualité. La prise en compte de ce problème, d'une manière globale et cohérente sur le plan expérimental, consiste en une avancée claire par rapport aux outils et méthodes existantes. L'objectif de ce travail est de définir une approche de numérisation 3D pour la réalisation d'attelles médicales garantissant une continuité d'informations depuis l'acquisition jusqu'à la construction de représentations 3D sur mesure [3].

Ce mémoire est détaillée de la façon suivante :

Le premier chapitre de ce rapport est consacré à l'étude bibliographique et méthodologique. Dans un premier temps et pour aborder le sujet de l'optimisation des ressources pour la reconstruction 3D, il a été nécessaire de nous documenter sur les différents types d'acquisition 3D qu'ils soient actifs ou passifs. Nous avons retenu une méthode pour

chaque type, la photogrammétrie comme méthode passive et le LiDAR comme méthode active.

Dans le second chapitre, nous avons détaillé les composants utilisés pour le montage de prototypes ainsi que les logiciels utilisés pour l'acquisition des données.

Le troisième chapitre, nous détaillerons les résultats de numérisation 3D par les deux méthodes pour des solutions orthopédiques. Nous terminerons avec les conclusions et les perspectives de l'étude.

Chapitre I

Quel système doit-on utiliser
pour l'acquisition 3D ?

Sommaire

I	Classification des systèmes d'acquisition	
I.1	Acquisition passive.....	5
I.1.1	Shape from X.....	6
I.1.2	La photogrammétrie	6
I.1.3	Application de la Photogrammétrie.....	8
I.1.3.1	<i>La cartographie et l'archéologie</i>	8
I.1.3.2	<i>Modélisation photo / modélisation basée sur l'image..</i>	9
I.1.3.3	<i>La numérisation 3D</i>	10
I.2	Acquisition active.....	11
I.2.1	<i>Triangulation par point laser</i>	11
I.2.2	Lumière structurée.....	11
I.2.3	Temps de vol.....	11
I.2.3.1	LA TECHNOLOGIE LiDAR.....	12
I.2.3.2	Applications du LiDAR.....	12
I.2.3.3	<i>Modélisation des mesures LiDAR</i>	12
I.3	Conclusion.....	16

I. Classification des systèmes d'acquisition

Le développement de systèmes d'acquisition de données 3D a fortement progressé. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour l'acquisition d'objets 3D et se classent en deux grandes familles : acquisitions par contact ou par non-contact.

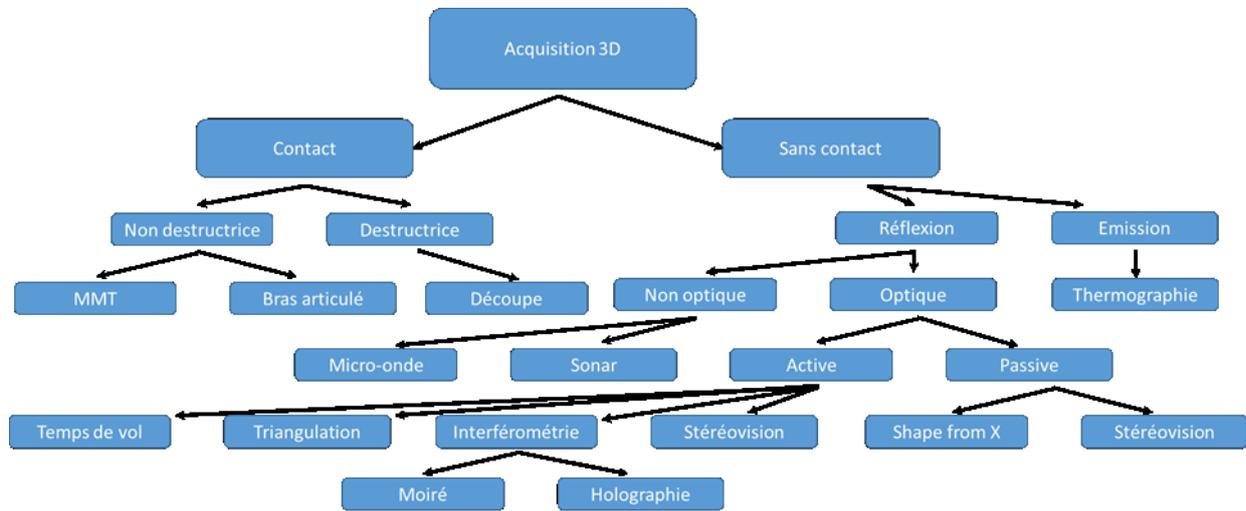


Figure I.1 Classification des systèmes d'acquisition 3D [1].

Les acquisitions par non-contact peuvent être soit active soit passive. Dans l'optique d'accroître les vitesses de contrôle, tout en ayant une très bonne qualité, les techniques de contrôle sans contacts n'ont aucune altération de l'objet étudié. Mais ces différentes techniques, aussi différentes soient-elles, possèdent leurs avantages et leurs inconvénients par rapport aux mesures effectuées par un système à palpeur de haute précision. Certaines présentent l'avantage de pouvoir s'exécuter dans un temps relativement bref, d'autres permettent une répétabilité accrue. Selon le classement de Curless, 2000 [1], ces systèmes peuvent être basés sur la corrélation d'images, la stéréographie, les méthodes de Moiré, temps de vol...[4].

I.1. Acquisition passive

Les méthodes dites passives n'émettent aucun type de radiation, mais mesurent les informations de l'environnement telles que la lumière et ses variations. Ces méthodes sont normalement peu chères à mettre en œuvre car elles ne nécessitent pas de systèmes hardware particuliers. Un type d'acquisition passive est la stéréographie. Le système de stéréographie repose sur la vision humaine et sur l'utilisation de deux caméras séparées regardant le même objet. En analysant les différences entre les deux images, il est alors possible de retrouver la

distance de chaque point par rapport à la caméra. Dans ce projet, nous nous pencherons sur quelques systèmes passives dans ce qui suit.

I.1.1. Shape from X

C'est une technique d'extraction d'informations de forme, "Shape from X". Cette technique de reconstruction se divise en différents domaines en fonction du matériel analysé et du type de primitive dans l'image qui est utilisée :

- La stéréovision (décrite précédemment), qui traite de la reconstruction à partir de positions de points caractéristiques dans plusieurs images (shape from stereo),
- La reconstruction à partir de la fonction d'intensité dans une image (shape from shading),
- La reconstruction à partir des contours dans une image (shape from silhouettes),
- La reconstruction à partir du mouvement (shape from motion),
- La reconstruction par la texture (shape from texture),
- La reconstruction à partir de la mesure du flou (shape from focus),
- La reconstruction à partir des informations de polarisation des réflexions lumineuses (shape from polarization),
- La reconstruction à partir du rayonnement IR émis après échauffement de la pièce inspectée (shape from heating),
- La reconstruction à partir de la fluorescence générée lors de l'interaction d'un rayonnement UV et d'une surface (shape from fluorescence).

I.1.2. La photogrammétrie

La photogrammétrie est une application particulière de la stéréovision. L'utilisation de règles et de mire calibrées dans le champ de vue des caméras permet de reconstruire l'objet en relief tout en contrôlant ses dimensions. Malgré un essor très récent de la photogrammétrie, c'est une technique ancienne qui existe depuis plus de 150 ans. La photogrammétrie est née d'une combinaison et de la rencontre entre deux sciences et discipline d'une part la géométrie perspective et la photographie[5].

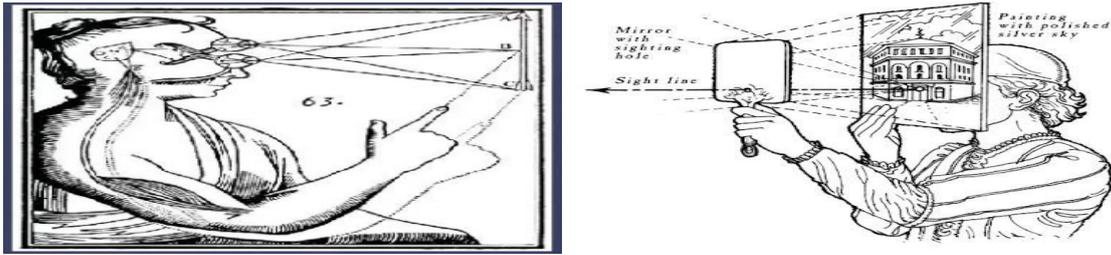


Figure I.2 Perspective de la vision humaine.[6]

Juste après la création de la photographie dès 1850, on s'apercevait très rapidement un premier usage de la photogrammétrie. La Métré photographie a vu le jour avec un usage militaire qui avait pour but d'extraire de la mesure à partir de photos [6]. Par la suite entre 1900 et 1920, la photogrammétrie s'est complexifié et évolué à partir d'œuvres basées sur des stéréoscopies (stereoscopic viewing) avec les travaux de Carl Pulfrich créé en 1901 sur le stéréocomparateur. Cette première phase historique concerne ce qu'on appelle la stéréo photogrammétrie terrestre avec de nombreuses machines, il faut juste comprendre qu'à cette période la photogrammétrie se faisait par le biais de machines plus ou moins complexes et en faisant appel à des opérateurs qui sont des experts dans le domaine [7]. Après cela et dès 1920 avec l'émergence des sciences de l'aviation, la photogrammétrie est passée du domaine terrestre au domaine aérien. Un exemple notable lors de cette période est l'utilisation des ballons de Nadar avec l'acquisition d'images à des fins militaires [8].



Figure I.3 La photographie Nadar.

À partir de 1940, la photogrammétrie a connu une autre période dite analogique où les machines se sont encore une fois complexifiées et les procédés ont eu tendance à se rationaliser. Donc, on s'est aperçue que les machines sont complexes et on peut aussi les relier des dispositifs qui sont en train d'émerger comme les micro-ordinateurs. A partir de 1975, il y a une autre période qui

s'appelle la photogrammétrie analytique jusqu'à 1984 avec l'article de Ackermann qui a effectué la première corrélation d'images numérique .

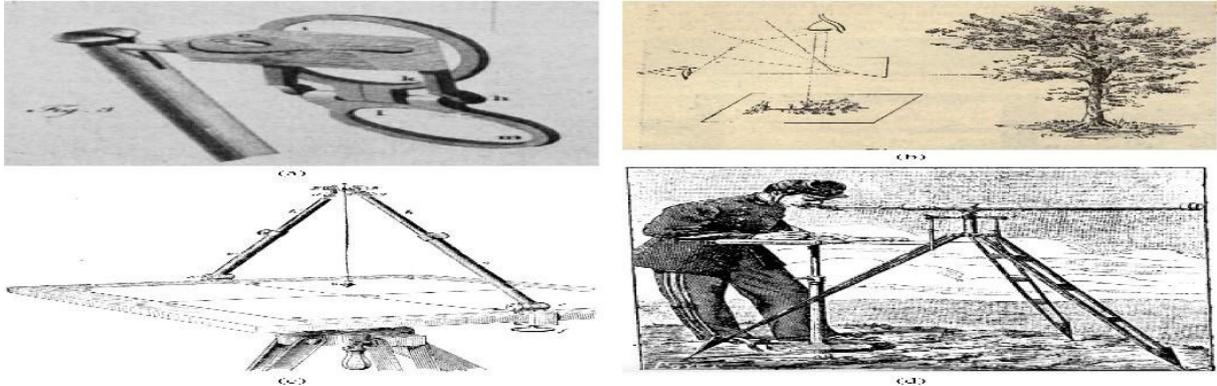


Figure I.4 Différentes méthodes de mesures de longueurs.

C'est ensuite l'époque de l'informatique que la photogrammétrie s'est digitalisée avec une première approche avec ce qu'on appelle les photogrammétries Workstation c'est-à-dire les mêmes dispositifs que l'on avait auparavant mais cette fois-ci tout est informatisé où tout passe par une digitalisation des processus. Une deuxième étape qui concerne la photo-modélisation était en fait un processus hybride où on avait besoin d'un opérateur qui devait sélectionner des points qui ensuite reconstruisait le modèle directement à partir des vues orientées 3D [9].

I.1.3. Application de la Photogrammétrie

En plus de l'acquisition de données 3D, la photogrammétrie est une technique qui peut permettre d'acquérir les informations de texture de l'objet. Pour améliorer sa précision, la photogrammétrie est souvent couplée à la triangulation laser afin de tirer avantages des deux technologies. L'utilisation des informations de la photogrammétrie pour diminuer l'erreur de recalage des différentes vues acquises par triangulation laser

I.1.3.1. La cartographie et l'archéologie

Une des applications les plus courantes de la photogrammétrie est la cartographie. Dans ce cas, la photogrammétrie est le processus de création d'une carte avec des améliorations cartographiques qui ont été conçues à partir d'une photomosaïque contrôlée où les photographies individuelles sont rectifiées pour être inclinées et portées à une échelle régulière. La photographie aérienne a été largement utilisée pour cartographier les sites

archéologiques. Aussi, la photogrammétrie a été progressivement utilisée dans l'archéologie maritime en raison de sa facilité de reproduire des sites cartographiques par rapport à d'autres méthodes connues.

I.1.3.2. Modélisation photo / modélisation basée sur l'image

La modélisation basée sur l'image est la création d'une représentation 3D réaliste de l'élément capturé à l'aide d'une solution logicielle. La modélisation nécessite trois étapes essentielles qui sont :

1. L'obtention des données spatiales,
2. La reconstruction de surface 3D,
3. La restauration d'aspect optique.

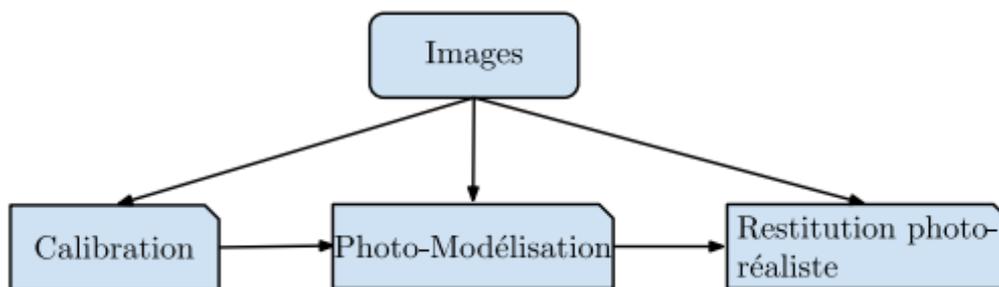


Figure I.5 Procédés utilisés pour le traitement sur les images

Nous utiliserons la capture de données spatiales par modélisation photographique pour reconstruire des surfaces et le calcul de la représentation visuelle colorée. Trois classes de solutions ont émergé pour la reconstruction 3D :

1. Solution de reconstruction 3D à saisie manuelle,
2. Solution automatique avec la maturité de la technologie de photogrammétrie,
3. Solution semi-automatique pour interagir avec les résultats obtenus automatiquement.

Quatre solutions logicielles pour la reconstruction 3D manuelle :

- Kanoma 1999 Développement commercial de FACADE [8]. Cette solution a disparu du marché après avoir été rachetée par Meta Creations puis Adobe Systems en 2000.

- Eosystems PhotoModeler 1993 Pionnier du marché, le logiciel n'a cessé d'évoluer depuis. Le modélisateur d'images RealViz 2000 [10] transfert de technologie de l'INRIA (Projet Robot Bis). Il a été acquis par Autodesk en 2009.
- Banzai Pipeline Ltd Enwair 2008 Conception de logiciels dédiés aux contraintes liées à la production Effets spéciaux. Cette solution est intégrée à Visual Production Business Tools.
- Autodesk Maya. Ces solutions demandent à l'utilisateur de saisir les informations appropriées Entre les images (généralement des points). Le calibrage des points se fait lorsque, la caméra est très placée dans l'espace. Dans la deuxième étape, l'utilisateur peut le faire manuellement. Les visages sont saisis entre des points 3D (repères). Cette tâche demeure difficile et de longue haleine, mais permet d'avoir un contrôle précis sur les points de repère. Cette solution est utilisée et est utile pour la modélisation avec un petit nombre de polygones.



Figure I.6 Image Modeler : Images source, points et Géométrie saisie manuellement avec rendu des couleurs.

Pour l'instant aucun logiciel ne fait de la reconstruction automatique par contre nous pouvons trouver des solutions semi-automatiques comme le logiciel Meshlab.

I.1.3.3. La numérisation 3D

Dans le domaine de la photogrammétrie, il y'a eu beaucoup de limitation physique reposant sur les images lorsque ces images ont un faible contraste.

Dans ces cas, la version générée contient souvent des lacunes nécessitant des nettoyages avec des outils comme MeshLab, netfabb ou MeshMixer.

Alternativement, la pulvérisation de tels objets avec un placage mat peut supprimer toute qualité évidente ou brillante. Cette application sera testée sur un prototype monté lors de ce projet de fin d'étude.

I.2. Acquisition active

Le principe des scanners actifs repose sur l'émission de certains types de radiation réfléchi par l'objet. La détection de ces ondes réfléchies permet ensuite de reconstruire la topologie de l'objet. Les différents types de radiation utilisés sont la lumière, les ultrasons et les rayons X[11].

I.2.1. Triangulation par point laser

Le laser scanner par triangulation utilise également la lumière pour mesurer les surfaces. Cette technique est appelée "triangulation" car l'émetteur laser, la caméra (qui enregistre la position du point laser sur la surface de l'objet) et le point laser forment un triangle. Connaissant la distance entre l'émetteur laser et la caméra et l'angle du laser, on peut alors déterminer exactement la forme de l'objet analysé.

I.2.2. Lumière structurée

Le principe de la lumière structurée est de projeter un modèle de lumière sur l'objet à acquérir et d'étudier la déformation de ce modèle sur l'objet. Une caméra enregistre la déformation du modèle sur l'objet et un algorithme complexe calcule la position des points sur cet objet. La complexité de l'algorithme est liée aux difficultés à prendre en compte la déformation du modèle de lumière en présence de trous ou de gros changements de topologie, éléments qui peuvent entraîner des ambiguïtés d'interprétation.

I.2.3. Temps de vol

Le système temps de vol « time-of-flight » utilise la lumière laser et mesure le temps de réflexion (via un capteur) de cette pulsation sur l'objet. Comme la vitesse de la lumière est très élevée, la limitation de ce système est liée à la précision avec laquelle le temps t de réflexion est mesuré. Ce type de scanner est donc très efficace pour les grandes surfaces (par exemple pour les fouilles archéologiques, des lieux géographiques ou des parfois décorées). Dans le cas de petits objets, le niveau de précision semble peu intéressant notamment au regard du prix du matériel.

Pour remédier à cet inconvénient, une nouvelle technologie a vu le jour appelé LIDAR. Cette technique signifie Light Detection and Ranging est une technologie basée sur des faisceaux laser. Il tire au laser et mesure le temps qu'il faut pour que la lumière revienne. Elle émet sa source d'énergie plutôt que de détecter l'énergie émise par les objets au sol.

I.2.3.1. LA TECHNOLOGIE LiDAR

Le premier prototype de LiDAR a vu le jour au début des années 60 par Hugues Aircraft Company, peu de temps après l'invention du laser. À la base, le LiDAR avait été inventé pour l'armée et il se nommait plutôt « Colidar pour Coherent Light Detecting And Ranging » pour servir au ciblage militaire. Le premier modèle connu avait la forme d'un fusil et avait une précision de 4.6 m ainsi qu'une portée de 11.3 km. C'est lors d'une expérience avec le Colidar en 1962 pour mesurer la distance avec la lune que l'on repéra de drôle de particules dans l'atmosphère. Ce détail captiva plusieurs chercheurs et dès 1969, le LiDAR fut utilisé par les météorologistes dans le but d'étudier les nuages et la pollution. Une nouvelle classe de LiDAR était née : Le LiDAR atmosphérique. Le LiDAR est rapidement devenu incontournable auprès du programme spatial. En 1971, le LiDAR a été utilisé pour créer une carte topographique de la Lune lors des missions d'Apollo 15 et 17. Avec des avancées technologiques notoires, il fut possible d'obtenir des données importantes sur la topographie de Mars et même de la Terre vue de l'espace¹. Le développement du LiDAR fut assez lent dû au manque de GPS commerciaux favorisant le déploiement des capteurs aériens. Ce ne fut que quelques années plus tard que le LiDAR a vraiment pris sa place dans les domaines qu'on lui connaît, grâce aux avancées avec la technologie GPS et la communication satellite pour transmettre les données. C'est à ce moment que le LiDAR est devenu très populaire. C'est au milieu des années 90 que les premiers LiDAR commerciaux ont vu le jour pour la cartographie topographique. Ils offraient des impulsions allant de 2 000 à 25 000 points par secondes. [12]

I.2.3.2. Applications du LiDAR

Généralement, la technologie LiDAR est utilisée dans différents domaines :

- **Création de carte** : il est généralement utilisé par les drones pour scanner une zone géographique et déterminer les qualités du terrain comme les collines et les pentes.

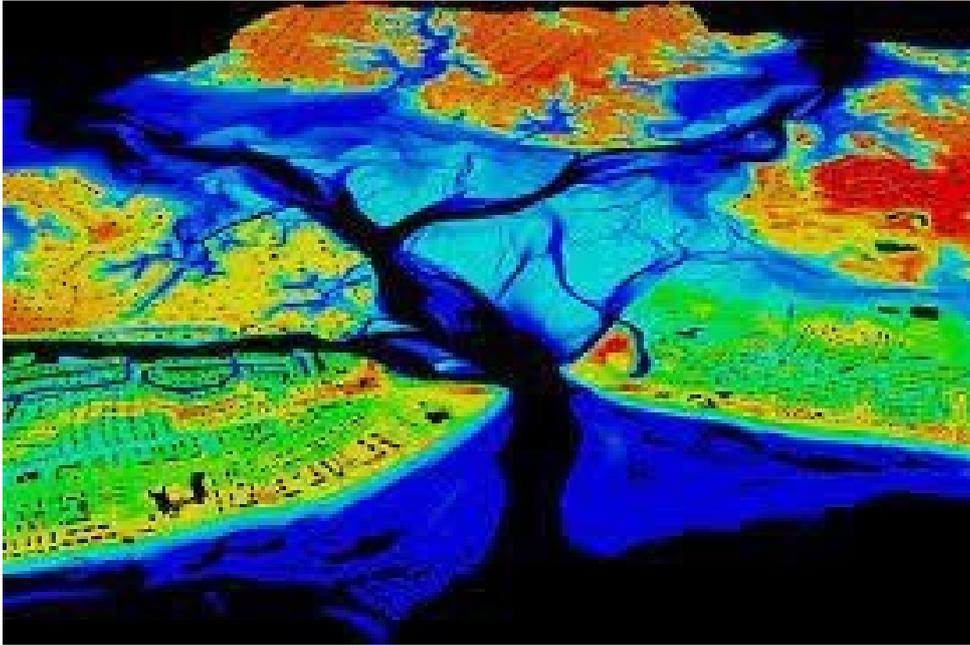


Figure I.7 Zone géographique scannée par la technologie LiDAR.

- **Voitures autonomes** : il est utilisé dans les automobiles autonomes scanner l'objet devant la voiture et pour calculer la distance entre la voiture et l'objet devant elle ou derrière elle.



Figure I.8 Principe de localisation des objets par la technologie LiDAR.

- Détection d'objets pour les systèmes de transport :
- Dans les systèmes de transport, il est essentiel d'assurer la sécurité des véhicules et des passagers et de concevoir des systèmes électroniques qui fournissent une assistance au conducteur, au véhicule et à son environnement. Les systèmes LiDAR jouent un rôle clé dans la sécurité des systèmes de transport.



Figure I.9 Scène scannée par la technologie LiDAR.

- Géologie et science du sol : Les cartes numériques d'altitude à haute résolution produites par LiDAR aéroporté et fixe ont conduit à ses avancées importantes en géomorphologie. Les capacités de cette technologie ont permis de de détecter des options topographiques raffinées : des terrasses de rivières et des berges, des reliefs glaciaires, d'évaluer l'altitude de la surface terrestre sous le couvert végétal. En 2005, le Tour Ronde dans le massif du Mont Blanc est devenu la montagne alpine d'abord élevée sur laquelle le LiDAR a été employé pour surveiller l'occurrence croissante de graves chutes de roche.[13]

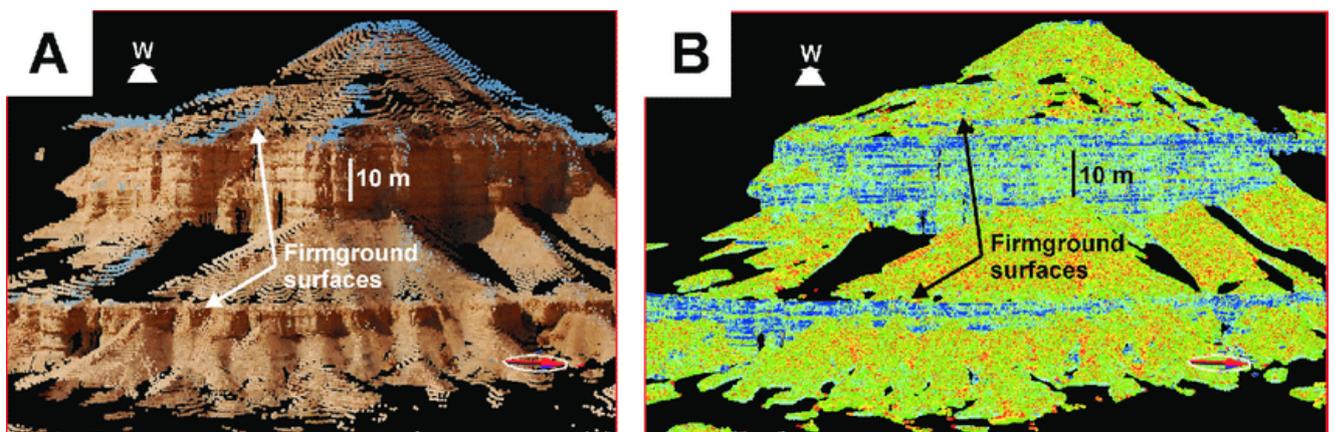


Figure I.10 Comparaison entre un scan photogrammétrique(A) et un scan avec LiDAR(B).

I.2.3.3. Modélisation des mesures LiDAR

Divers modèles existant pour l'estimation des propriétés biophysiques sont basés sur la technologie LiDAR. Ces modèles décrivent l'interaction des faisceaux laser avec l'objet cible. Le modèle de transfert du rayonnement décrit, simule et interprète l'impact de diverses caractéristiques de l'objet sur les mesures LiDAR. Quelques modèles de simulation LiDAR sont présentés ci-dessous.

a) GORT : Le modèle GORT "Optique géométrique et transmission du rayonnement" ou Optique géométrique par transmission du rayonnement. Ce modèle décrit les formes d'ondes LiDAR en fonction des paramètres de la structure 3D de la végétation. L'optique géométrique permet de décrire l'agglomération des feuilles dans les couronnes des arbres. GORT est appliqué et validé sur des forêts conifères. Cependant, il simule ces forêts avec des arbres très simplifiés qui ont un houppier ellipsoïdal et qui sont distribués aléatoirement. Les diffusions sont simulées à plusieurs ordres mais avec de fortes simplifications (e.g., calcul analytique sans suivi de rayon).

b) FLIGHT : FLIGHT (Forest Light radiative transfer) est un modèle qui simule la réflexion bidirectionnelle. La végétation et le LiDAR sont restitués. Il applique la méthode inverse de Monte Carlo pour simuler le transport de photons avec un schéma 3D de la végétation. Ce modèle initial a été modifié pour simuler une forme d'onde complète LiDAR. La structure d'une grande scène est modélisée par Primitives géométriques qui définissent la forme et la position de la couronne et du tronc en bois.

c) RLB(Rider Levett Bucknall) : Est un modèle temporel de radioactivité qui simule la propagation. Le LiDAR traverse le milieu forestier. Simule une forme d'onde LiDAR tenant compte des grappes de terrain et de végétation. Ce modèle est développé sur la base du modèle "RGM" (Radiosity Graphics Combined Model). Cependant, RGM ne considère pas le concept de temps. Par conséquent, en 2013, Huang et Wynne ont ajouté la théorie de la dépendance temporelle au rayonnement au RGM.

d) Dart : Le modèle 3D de transfert de rayonnement DART transfert de rayonnement anisotrope discret a été développé par le CESBIO depuis 1993. Il est le plus précis et complet. Il est utilisé dans de nombreux centres d'études pour de multiples applications (ex. NASA GSFC, CNES) et universités. [14]

I.3. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre différentes techniques de numérisation 3D. Pour réaliser un prototype qui teste la numérisation 3D, nous avons retenu une méthode passive qui est la photogrammétrie et méthode active qui est le LiDAR. Donc, nous avons établi un prototype pour chaque méthode choisie. Cela permettra d'évaluer les deux technologies en fonction des applications et de donner leurs limites. Avant d'exposer les résultats de ces techniques, nous exposerons dans le chapitre suivant le montage de ces deux prototypes.

Chapitre II

Quel prototype de numérisation ?

Sommaire

II	Quel prototype de numérisation ?	
II.1	Introduction.....	19
II.2	Composant électroniques utilisés.....	20
II.2.1	Contrôleur électronique.....	20
II.2.2	Les modules et moteurs utilisés.....	24
II.2.3	Capteurs pour numérisation.....	25
II.3	Réalisation des scanners.....	25
II.3.1	Scanner photogrammétrie	25
II.3.2	Scanner LiDAR.....	28
II.4	Logiciels d'acquisition numérique 3D.....	32
II.4.1	Meshlab.....	32
II.4.2	Blender.....	33
II.4.3	Meshroom.....	33
II.5	Conclusion.....	33

II.1. Introduction

Dans ce projet, nous avons développé deux prototypes pour construire un modèle 3D avec deux méthodes différentes la photogrammétrie et le LiDAR. Cette stratégie a permis de capturer les photos à l'aide de la première méthode et d'acquérir les informations suffisantes pour pouvoir construire le modèle 3D avec la seconde méthode. Pour la construction des deux scanner, nous avons eu besoin de ressources électronique pour une fluidité et une précision du mouvement et pour collecter les informations. Sachant que l'électronique est de plus en plus remplacée par l'électronique programmée. Dans ce type de configuration, nous parlons de systèmes embarqués ou d'informatique embarquée. Son but permet de simplifier les schémas électroniques et réduire ainsi l'utilisation de composants l'électronique, réduisant ainsi le coût de fabrication d'un produit. Cela conduit à plus de système complexe et efficace pour réduire l'espace. Depuis l'avènement de l'électronique, sa croissance est mesurée et continue aujourd'hui. Donc le challenge de ce travail nous a ramené à combiner de l'électronique et la programmation domaine appelée 'électronique embarquée. Ce domaine est souvent considéré comme sous-domaine de l'électronique et qui est capable d'unir la puissance de la programmation à la puissance d'appareil électronique en utilisant des microcontrôleur.

I.2. Composant électroniques utilisés

II.2.1. Contrôleur électronique

Il est plus recommandé d'utiliser des cartes type Arduino ou Raspberry Pie.

Basic	Arduino	Raspberry pi
Licence	Source ouverte	Sources fermées.
Consommation d'énergie	Consomme environ 200 MW	Consomme environ 700 MW
Structure matérielle	Structure matérielle simple	Matériel complexe Structure
Logiciel	Programmable en C/C++	prend en charge son propre système d'exploitation basé sur Linux
Coût	peu chères.	Plus chères

Tableau II.1 Comparaison entre la carte Arduino et la carte Raspberry Pie [11].

Pour faire notre choix par rapport aux deux cartes, une comparaison entre la Raspberry Pie et l'Arduino nous a guidé (tableau ci-dessous). Donc, nous avons choisi la carte Arduino car il est moins cher plus simple et plus facile à utiliser par rapport à sa documentation abondante et sa disponibilité. D'une manière générale, pour construire des systèmes physiques interactifs, en utilisant des logiciels et du matériel pouvant s'interfacer avec des capteurs et des actionneurs. Il existe plus de 20 versions de module Arduino[12], nous citons quelques-unes afin d'éclaircir l'évaluation de ce produit scientifique et académique :

- Le NG d'Arduino, avec une interface , une sortie USB pour le programmer et utilise un ATmega8.
- L'extrémité d'Arduino, avec une interface d'USB pour programmer et utilise un Microcontrôleur ATmega8.
- L'Arduino Mini, une version miniature de l'Arduino en utilisant un microcontrôleur ATmega168.

- L'Arduino Nano, une petite carte programmable à l'aide d'un porte USB cette version utilisant un microcontrôleur ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version).
- Le LilyPad Arduino, une conception de minimaliste pour l'application wearable en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- Le NG d'Arduino plus, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un ATmega168.
- L'Arduino Bluetooth, avec une interface de Bluetooth pour programmer en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Diecimila, avec une interface d'USB et utilise un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Duemilanove ("2009"), en utilisant un microcontrôleur l'ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version) et actionné par l'intermédiaire de la puissance d'USB/DC.
- L'Arduino Mega, en utilisant un microcontrôleur ATmega1280 pour I/O additionnel et mémoire.
- L'Arduino UNO, utilisations microcontrôleur ATmega328.
- L'Arduino Mega2560, utilisations un microcontrôleur ATmega2560, et possède toute la mémoire à 256 KBS. Elle incorpore également le nouvel ATmega8U2 (ATmega16U2 dans le jeu de puces d'USB de révision 3).
- L'Arduino Leonardo, avec un morceau ATmega3U4 qui élimine le besoin de raccordement d'USB et peut être employé comme clavier [13].

Parmi ces types, nous avons choisi une carte Arduino UNO. La raison principale de ce choix est parce que cette carte son prix est très abordable , sa disponibilité et pour finir elle est parfaite pour la mise en œuvre d'une telle commande qui sera détaillée par la suite.

La carte Arduino Uno est basée sur un ATmega328 cadencé à 16 MHz. C'est la plus simple et la plus économique carte à microcontrôleur d'Arduino. Des connecteurs situés sur les bords extérieurs du circuit imprimé permettent d'enficher une série de modules complémentaires[14].

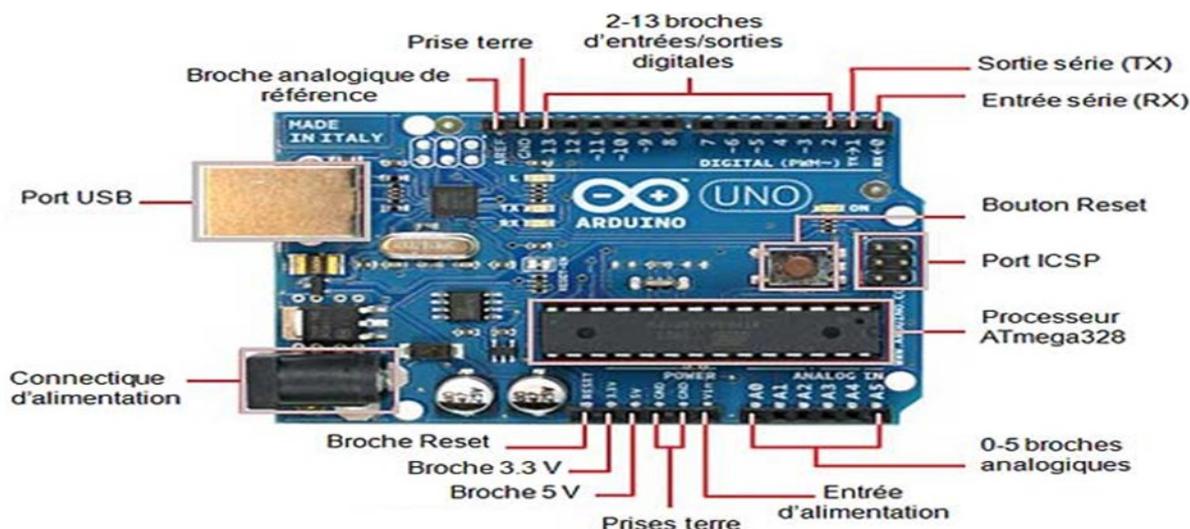


Figure II.1 Description de la carte Arduino UNO.

Généralement, tout module électronique qui possède une interface de programmation est basé toujours dans sa construction sur un circuit programmable ou plus.

Microcontrôleur	ATmega328
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12V
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
Broches E/S numériques	14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM)
Broches d'entrées analogiques	6 (utilisables en broches E/S numériques)
Intensité maxi disponible par broche E/S (5V)	40 mA (ATTENTION : 200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V	50 mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 5V	Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mA max si port USB utilisé seul
Mémoire Programme Flash	32 KB (ATmega328) dont 0.5 KB sont utilisés par le bootloader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	2 KB (ATmega328)
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	1 KB (ATmega328)
Vitesse d'horloge	16 MHz

Tableau II.2 Constitution de la carte Arduino UNO.

Les sources de l'alimentation de la carte peuvent être connecté via USB (de 5V à 500mA) ou connectées à une alimentation externe. Où ; la carte peut fonctionner à partir d'une alimentation externe de 6 à 20 volts. Cependant, si la carte fournir moins de 7 V, la broche 5 V peut fournir moins de 5 V, et la carte peut devenir instable. Si on utilise plus de 12V, le régulateur de tension de la carte peut la chauffer. Dans notre cas afin qu'on puisse alimenter notre carte avec ces moules et moteurs nous avons de l'alimenter via une alimentation 220 volts modifiable afin de fournir des tensions inférieurs pour les moteurs.

Les broches numérotées de 0 à 13 intégrés dans cette carte sont les entrées sorties numériques. Certaines d'entre elles peuvent également être utilisées en sortie PWM(Pulse Width Modulation) (en rose). Les broches 0 et 1 servent aussi à la communication série (en rouge).

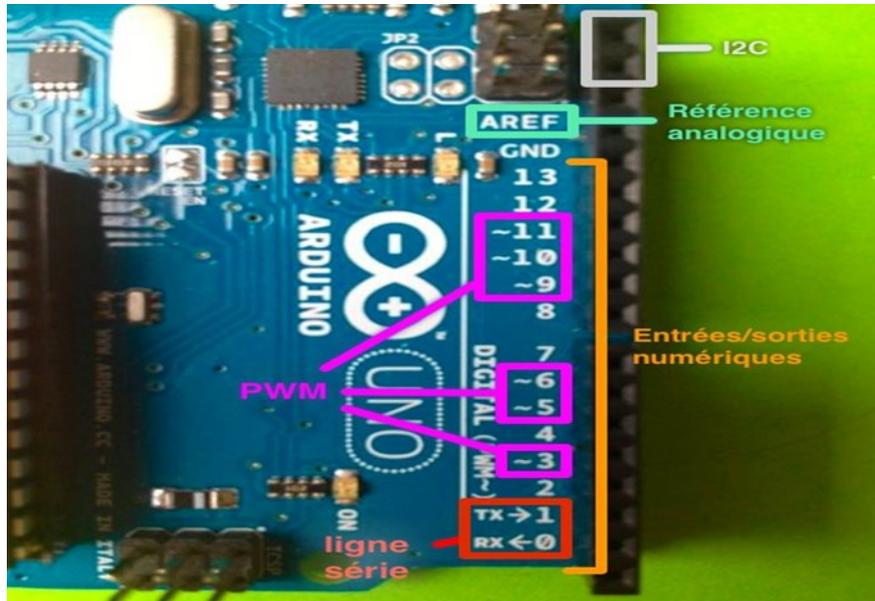


Figure II.2 Les entre et sortie numérique de la carte Arduino UNO.

Aussi, une carte Arduino dispose de 6 entrées analogiques A0 à A5. Pour la version UNO, l'entrée du convertisseur A0 accepte une tension analogique comprise entre 0 et 5V maximum, qui sera convertie en un nombre binaire N compris entre 0 et 1023.

Une telle carte de conversion basée sur sa construction sur un microcontrôleur doit être équipée d'une interface de programmation comme c'est le cas de nos cartes. L'outil de programmation est open source pour Arduino et peut être téléchargé gratuitement pour Mac OS X, Windows et Linux. Lorsque le programme Arduino en tant qu'éditeur de code est écrit ou modifié, il sera transféré et stocké dans La carte est connectée via USB. Le câble USB alimente la carte. Comme tout langage de programmation, l'interface flexible et simple est exécutable sur n'importe quel système d'exploitation Arduino basé sur la programmation. Avant d'envoyer le programme à la carte, le type doit être sélectionné Numéros de port de la carte (Arduino UNO) et USB (COM). Généralement, un programme Arduino est une suite d'instructions élémentaires sous forme textuelle (ligne par ligne). La carte lit puis effectue les instructions les unes après les autres dans l'ordre défini par les lignes de codes

II.2.2. Les modules et moteurs utilisés

La carte Arduino généralement est associée aux accessoires qui simplifient les réalisations

Les modules et moteurs utilisés :

1. Moteur pas à pas (Néma 17et Néma 34) :

Un moteur pas à pas permet de transformer une impulsion électrique en un mouvement angulaire. On trouve trois types de moteurs pas à pas : le moteur à réluctance variable ; le moteur à aimants permanents ; le moteur hybride, qui est une combinaison des deux technologies précédentes.

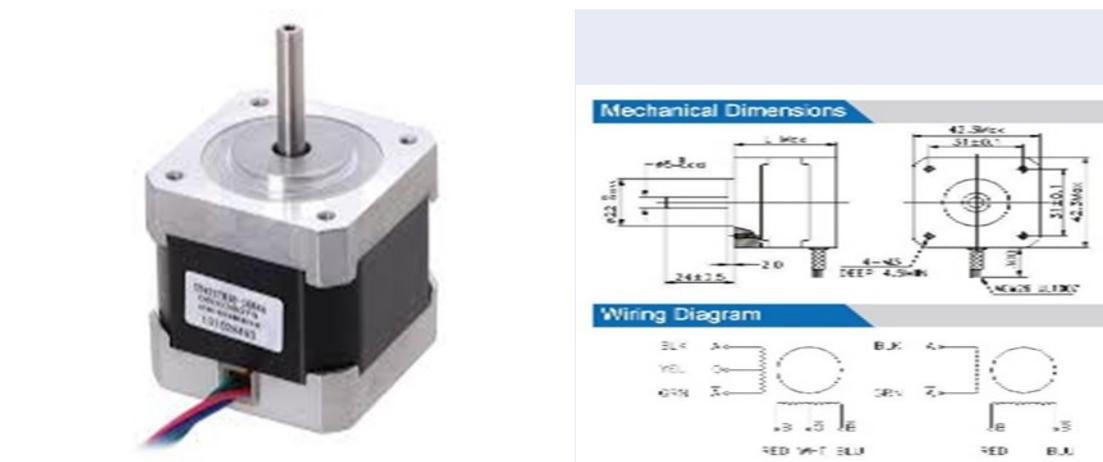


Figure II.3 Moteur pas à pas avec son datasheet.

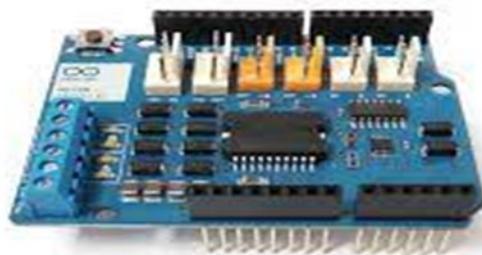


Figure II.4 Shield pour Arduino UNO.

Les Shields Arduino sont des cartes qui se branchent sans soudure aux cartes Arduino ou à d'autres shields Arduino pour augmenter leurs capacités (WiFi, 4G, écran,

bluetooth...). Les Shields Arduino conservent l'esprit original de Arduino, facile à produire et à utiliser.

II.2.3. Capteurs pour numérisation

Lors de ce travail, nous avons utilisé un capteur d'image à travers un smartphone pour la photogrammétrie. Pour le second montage un capteur LiDAR qui permet de mesurer des distances de 0 à 30 CM. Ce module communique avec un microcontrôleur type Arduino via une liaison PWM ou I2C. Il est paramétrable pour obtenir un compromis entre précision, plage de mesure et temps d'acquisition. Il est compact, léger et économe en énergie [5]



Figure II.5 Capteur LiDAR.

II.3. Réalisation des scanners

II.3.1. Scanner photogrammétrie

Pour réaliser notre scanner, nous avons en premier temps pensé aux fonctionnalités du cahier charge suivant :

- Prise des photos de différents angles,
- Support pour la cameras
- Rotation de la cameras sur 180 degrés
- Environnement neutre pour la prise des photos
- Plateforme qui tourne à 360 degrés pour scanner l'objet

Pour le réaliser nous nous sommes basé sur trois grandes étapes :

1. Réalisation du corps de base • mécanisme de rotation
2. Réalisation de plateforme de rotations a 360 degré
3. Programmer le moteur à l'aide de la carte Arduino

Le corps de base est fait de bois, nous avons pris une grande planche de bois qui fait 1,20 mètre de largeurs et 2,80 mètre de hauteur. Nous l'avons coupé en 4 parties. Une partie a été utilisé comme base et la deuxième partie a été coupé en un demi-cercle qui nous à aider pour prendre des photos jusqu'à 180 degrés. Après cela, nous avons fabriqué des ailles avec

une petite plateforme pour placer le smartphone. Nous avons assemblé toutes les pièces afin d'avoir la carcasse de notre scanner photogrammétrique puis nous l'avons couvert avec une plaque en pvc en forme de demi-cercle.

Pour avoir un environnement neutre, nous avons peint tout l'intérieur de couleur blanche pour une réflexion maximale de la lumière et Pour permettre au smartphones de prendre des photos de différents angles, nous avons réalisé un mécanisme manuel en plaçant un roulement dans le demi-cercle sur une tige métallique soudée en L et fixée un support pour smartphone.



Figure II.6 Corps de base de notre scanner.



Figure II.7 Intérieure de notre scanner.

Nous avons découpé un cercle d'un diamètre de 10 centimètre dans une planche , nous avons fixé son centre au moteur pas à pas qui est un Néma 34. Nous avons programmé

le fonctionnement du moteur à l'aide de la carte Arduino pour faire tourner le cercle en 360 degrés avec une pose chaque 30 degré pour permette la prise des photos de l'objet sur différents angles.



Figure II.8 La plateforme de rotation.

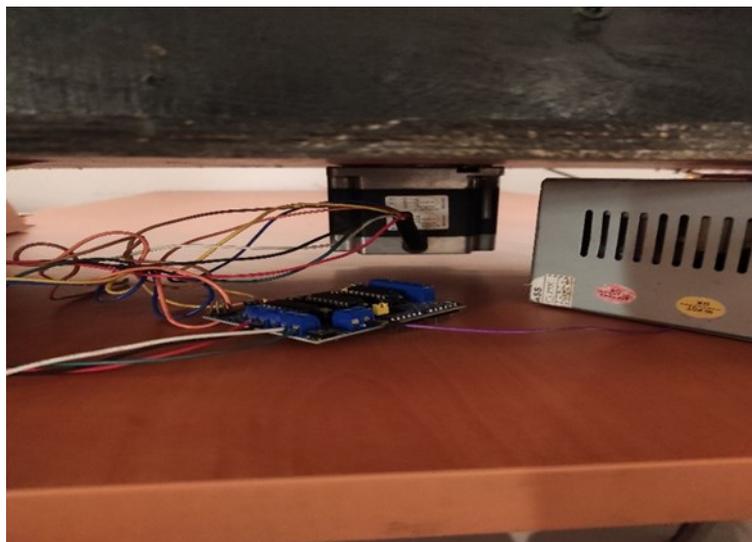


Figure II.9 Le branchement du moteur avec le Shield et l'alimentation.

Dans notre cas, nous ne pouvons pas brancher directement l'Arduino au moteur car celui-ci fourni seulement 5v et c'est insuffisant pour alimenter le moteur donc on était obligé d'utiliser le Shield. Ce dernier permet de brancher une alimentation qui va servir à alimenter notre Néma 34. Pour brancher le Shield a l'Arduino, il a suffi seulement d'insérer les pins de l'Arduino au Shield après l'alimentation au Shield.

Pour programmer la carte Arduino, nous avons commencé par inclure la bibliothèque requise pour notre moteur. Après cela, nous avons pu régler la vitesse de rotations du moteur en programmant une pose de trois secondes tous les 30 degrés pour la prise de photo.

II.3.2. Scanner LiDAR

Pour réaliser notre scanner, nous avons séparé notre travail en deux parties : partie électronique et partie mécanique.

Pour la partie électronique il nous faut :

- Deux cartes Arduino uno
- Une alimentation qui fournit 12v
- Un capteur LiDAR
- Une carte SD pour enregistrer les informations et son module
- Deux moteurs pas-à-pas (Néma 17) et son Shield pas-à-pas

Pour la partie mécanique, nous avons utilisé :

- Une base pour le scanner
- Une plaque pour fixer nos moteurs pas-à-pas
- Un morceau de tige à filtrer
- Deux tiges en métal pour guider
- Un chariot pour placer le capteur LiDAR (réalisé par l'imprimante 3D)
- Une pièce pour fixer la tige métallique au moteur (réaliser par l'imprimante 3D)
- Une plaque de contrainte pour maintenir les arbres de guidage parallèle (réaliser par l'imprimante 3D)
- Une plaque tournante pour faire tourner l'objet à scanner (réaliser par l'imprimante 3D)

Pour le montage, nous avons commencé par ramener une planche de bois qui fait 40 cm et 20 cm de largeur comme base pour notre scanner. Ensuite, nous avons fixé deux tiges métalliques de manière parallèle avec un écart de 10 cm comme montrer dans figure II.10.



Figure II.10 Base en bois de notre scanner LiDAR.

Ces deux tiges vont nous servir à guider notre chariot. Celui-ci est utilisé pour fixer le capteur LiDAR sur sa face avant. Deux roulements linéaires sont placés à l'aide d'attache à glissière pour commander le chariot sur lequel le capteur est fixé. Une plaque tournante est montée sur le moteur pour la rotation de l'objet à scanner.

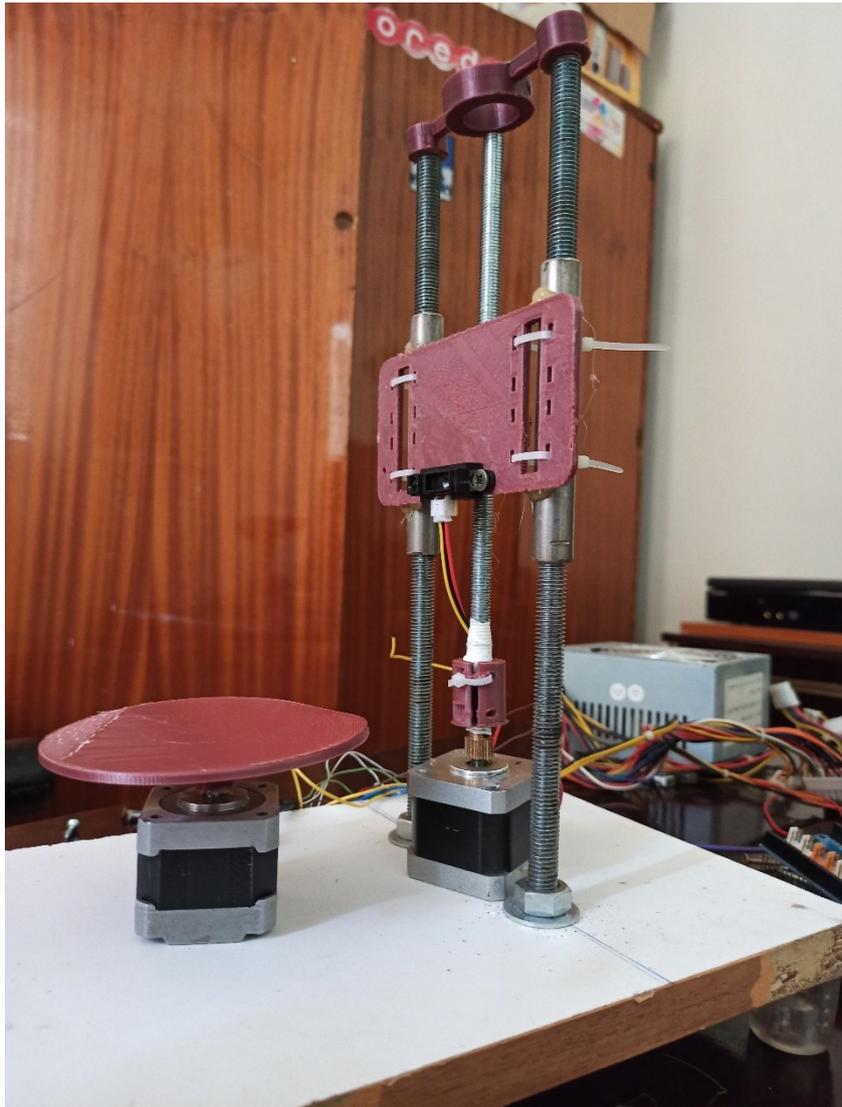


Figure II.11 Prototype de scanner 3D LiDAR.

Ici, nous avons deux moteurs un pour le chariot et le deuxième pour la plaque tournante. Un seul Shield est utilisé pour les contrôler. Celui-ci est fixé sur l'un des deux Arduino pour le connecter aux deux moteurs via le datasheet. Le deuxième Arduino commande le capteur Lidar ainsi que le module SD utilisé pour le stockage des informations collecté par le capteur.

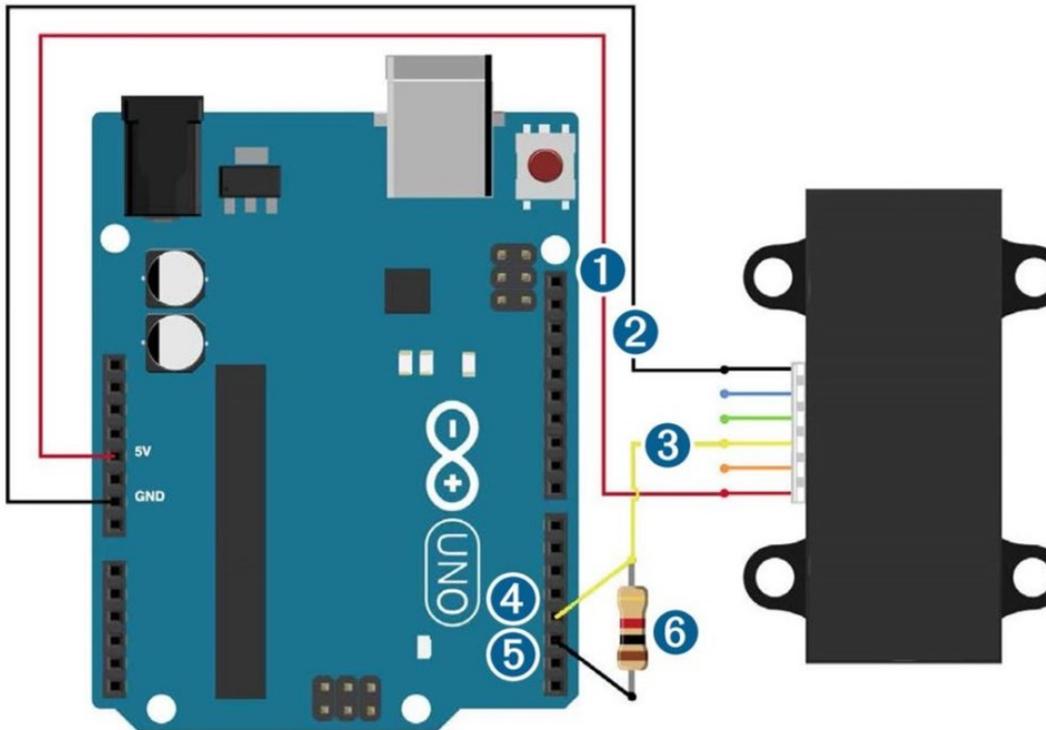


Figure II.12 Branchements capteur Lidar avec Arduino

Pour la partie programmation, nous avons importé la bibliothèque AF Motor.h utilisé pour paramétrer nos moteurs. Ce code aura comme fonction de faire tourner le moteur de la plateforme. Sachant qu'une rotation de 360 degrés nécessite 200 pas car un pas correspond à 1,8 degré. Après une rotation complète de 360 le chariot va monter grâce au deuxième moteur de 1mm pour une deuxième rotation. Cette opération sera répétée par une boucle jusqu'à atteindre la hauteur complète de l'objet scanné.

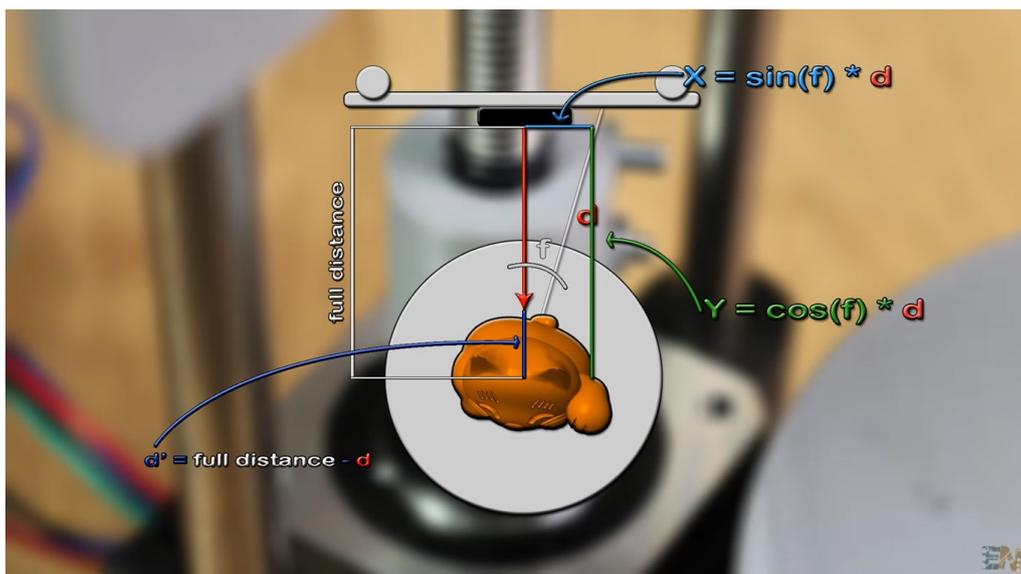


Figure II.13 Mouvement des deux moteurs

L'ors du scanne la prise du premier Point est facile mais pour avoir les coordonnées des autres points qui vont constituer notre modèle il faut appliquer une formule mathématique, et donc pour avoir la coordonné x il faut calculer $\sin(f)$ ou f est l'ongle de rotation de notre objet foi d qui est la distance qui sépare le capteur de l'objet. Et pour y on fait la même chose mais aux lieux de calculer $\sin(f)$ on calcule $\cos(f)$ cette fois comme il est montré sur la figure **II.13** .

La deuxième carte Arduino a pour but de collecter les informations requis par le capteur et de les transférer à la carte sd en format TEXT. Ce fichier donne ligne par ligne les coordonnées XYZ de l'objet scanné appelées nuage de points.

```

30571
-0.037829 0.12794 0.004474
-0.044779 0.128887 0.001904
-0.068009 0.151244 0.037195
-0.002287 0.13015 0.02322
-0.022605 0.126675 0.007155
-0.025107 0.125921 0.006242
-0.03712 0.127449 0.001795
0.033213 0.112692 0.027686
-0.025508 0.112568 0.036676
-0.02453 0.112636 0.037346
0.027403 0.12156 0.02122
-0.062896 0.158419 -0.017587
0.040081 0.104202 0.022168
0.045153 0.093196 0.01116
-0.032496 0.174231 -0.002389
-0.072494 0.126022 0.052902
0.007998 0.131294 0.0169
0.040026 0.10701 0.008165
0.037165 0.099717 -0.009812
-0.090596 0.140629 0.022169
-0.084341 0.109004 0.02436
-0.06887 0.156258 0.01477
-0.084478 0.152284 0.026984
0.005367 0.125777 0.031792
0.008932 0.124393 0.033075
-0.031541 0.125778 0.003875
-0.049674 0.141672 0.012389
-0.078482 0.135851 0.050645
-0.004258 0.128035 0.028334
-0.045478 0.123431 0.02512
-0.023538 0.11268 0.037997
-0.07902 0.093561 -0.010596
    
```

Figure II.14 Les informations collectées au format TEXT.

Le scan d'un objet dépend des paramètres du code Arduino tels que la résolution angulaire souhaitée, le nombre d'échantillons de balayages par lecture et le temps de pause entre chaque rotation du plateau tournant. Après la fin du balayage, on injecte les informations de la carte SD à l'ordinateur en les traitants à l'aide du logiciel Meshlab. On obtient un nuage de points désignant la forme de notre objet et suivra la transformation au format STL(Stéréolithographie) nécessaire pour l'impression 3D.

II.4. Logiciels d'acquisition numérique 3D

Pour le traitement des images obtenues, nous avons utilisé plusieurs logiciels.

II.4.1. Meshlab

Meshlab est un système open source pour le traitement et l'édition de maillages triangulaires 3D. Il fournit un ensemble d'outils pour éditer, nettoyer, réparer, inspecter, rendre, texturer et convertir des maillages. Il offre des fonctionnalités pour le traitement des données brutes produites par les outils de numérisation 3D et pour la préparation de modèles pour l'impression 3D.

Ce système prend en charge les entrées/sorties dans les formats suivants : PLY, STL, OFF, OBJ, 3DS, VRML 2.0, X3D et COLLADA. MeshLab peut également importer des nuages de points reconstruits à l'aide de Photosynthèse

II.4.2. Blender

Blender est un logiciel gratuit et open source d'infographie 3D utilisé pour la création de films animés, effets visuels, art, modèles imprimés en 3D, motion graphics, applications 3D interactives, réalité virtuelle.

À l'origine, Blender était prévu comme application interne pour NeoGeo ; il est né d'une série d'outils préexistants, dont un traceur de rayons construit pour l'Amiga. Cette première version de Blender était destinée à répondre à une frustration éternelle parmi les créatifs : quand un client difficile a besoin de plusieurs modifications à un projet.

II.4.3. Meshroom

Meshroom est un cadre de vision par ordinateur photogrammétrique fournissant des algorithmes de restructuration 3D et de suivi de caméra. Il permet de créer un modèle texturé 3D à partir de l'analyse d'un ensemble d'images non ordonnées d'une scène statique prise avec n'importe quel type de caméras, des caméras professionnelles aux smartphones. La bibliothèque est composée de modules pour l'extraction caractéristique, la correspondance d'images, la transformation d'échelle#, l'étalonnage et la localisation de la caméra, l'estimation de cartes de profondeur, le maillage et la texturation.

II.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes étapes de réalisation de scanners 3D. Le premier est basé sur une méthode passive qui est la photogrammétrie et le deuxième est basé sur méthode active qui est le LiDAR. Nous avons détaillé les composants des prototypes et les logiciels d'extraction de données. Le chapitre suivant sera consacré à la numérisation par ces deux méthodes pour numériser en 3D des attelles orthopédiques.

Chapitre III

Appareillage orthopédique sur mesure par la numérisation 3D

Sommaire

III	Classification des systèmes d'acquisition	
III.1.	Introduction.....	36
III.2.	Méthodologie.....	37
III. 3.	Impression 3D.....	38
III.4	Test des prototypes.....	39
III.4.1	Scan par le prototype de photogrammétrie	39
III.4.2	Scan par le prototype LiDAR.....	42
III.5	Comparaison entre scan 3D photogrammétrie et LiDAR.....	43
III.6	Conclusion.....	43

III.1. Introduction

Dans le domaine de l'orthopédie la technologie, les nouvelles technologies telles que le scan 3D et la 3D l'impression est utilisée pour fabriquer des attelles de nouvelle génération pour des dispositifs médicaux personnalisés. L'idée est bien de rendre ces solutions plus accessibles et de proposer des offres entièrement adaptées, que ce soit pour le pied, la main ou encore le dos. Les imprimantes 3D pourraient être une solution pour concevoir des dispositifs médicaux à faible coût.

L'impression 3D est de plus en plus utilisée dans le domaine du médical, les médecins se sont intéressés aux applications médicales orthopédiques [15] surtout pour la planification préopératoire considérée comme un aspect important pour toute chirurgie. Grâce à cette méthode, les chirurgiens planifient et répètent mentalement l'intervention en utilisant différentes modalités d'imagerie qui permettent de fournir des détails sur les anomalies anatomiques par rapport à l'anatomie normale d'un patient dans le but de réduire les risques chirurgicaux. À l'heure actuelle, la plupart des plans préopératoires sont réalisés soit sur la base de radiographies conventionnelles, soit d'un scanner (tomodensitométrie) ou d'IRM [16]. Dans ce projet, nous viserons à utiliser ces images 2D et 3D obtenues pour les traiter par des outils numériques pour la conception d'attelles orthopédique en particulier dans les cas compliqués comme la scoliose.

Les affections ostéoarticulaires et musculaires sont le premier facteur du handicap dans le monde (la lombalgie est la cause la plus fréquente). Elles limitent beaucoup la mobilité et la dextérité, avec pour conséquences une cessation de l'activité, diminution du bien-être et une capacité réduite dans la société. Environ 1.71 milliard de personnes dans le monde sont atteintes. Les affections ostéoarticulaires et musculaires recouvrent plus de 160 affections : - Atteintes aiguës, soudaines, de courtes durée : les fractures, entorses, post traumatique le plus souvent. - Atteintes chroniques, états pathologiques durables : infirmité motrices d'origines cérébrales (IMC), arthroses, maladies rhumatismales, ostéoporose, scoliose, ... L'infirmité motrice cérébrale (IMC), et la Scoliose sont des problèmes majeurs de santé publique en Algérie car elle touche 3 personnes pour 1000 habitants (pour la scoliose), la prévalence en Algérie du handicap moteur est de 44 %. Le traitement orthopédique par les contentions externes (plâtre ou résine), attelles de postures, et les corsets adaptés reste le plus fréquemment utilisée (60 à 80%). Toutes ces données épidémiologiques et thérapeutiques nous poussent à développer la conception et la confection numérique de cet appareillage

orthopédique pour un meilleur confort des patients et surtout un traitement efficace, moindre coût pour l'état, et surtout une réinsertion socio-professionnelle rapide de cette population cible.

III.2. Méthodologie

L'utilisation de modèles 3D en médecine est particulièrement intéressante surtout en orthopédie. La complexité de la prise en charge des cas de scoliose par exemple, peut être un défi pour améliorer le confort du patient et réduire le cout des corsets. La scoliose maladie de la colonne vertébrale est souvent difficile à traiter, car les personnes concernées doivent généralement porter des supports dorsaux désagréables et encombrants pendant de nombreuses heures. Sachant que la scoliose fait référence à une courbure de la colonne vertébrale qui se produit souvent chez les enfants à l'adolescence. En fonction de la gravité, les corsets sont également utilisés pour la thérapie. La fabrication du corset traditionnel utilisait souvent des moulages en plâtre fait à la main qui est considéré comme inconfortable et très complexe. Le corset de scoliose 3D vise à faciliter le traitement des patients en créant une alternative à la mode et confortable avec leur innovation sur mesure en utilisant la numérisation 3D. La possibilité d'une visualisation 3D de l'anatomie exacte du patient, peut donner l'accès aux fichiers numériques 3D qui peuvent être utilisé pour la conception des corsets. Où, la numérisation 3D / l'impression 3D permet d'établir des dessins, par ex. avec des structures en nid d'abeille respirantes. En conséquence, le confort de port est amélioré, ce qui a un effet positif sur le succès de la thérapie.



Figure III.1 Différents types de corset de scoliose.



Figure III.2 Corset de scoliose imprimé sur mesure par impression 3D.

III. 3. Impression 3D

L'idée est bien de rendre ces solutions plus accessibles et de proposer des offres entièrement adaptées, que ce soit pour le pied, la main ou encore le dos. Les imprimantes 3D pourraient être une solution pour concevoir des dispositifs médicaux à faible coût. La fabrication de dispositifs médicaux personnalisés pourrait bien être largement facilitée grâce à l'impression 3D.

Il existe aujourd'hui deux techniques de fabrication tridimensionnelle d'un objet : une technique soustractive et une technique additive. La technique de conception tridimensionnelle soustractive présente l'avantage d'être peu onéreuse, cependant les objets sont peu précis et ne peuvent pas être stérilisés si nécessaire. De ce fait, l'impression 3D par

fabrication additive est présentée comme un nouvel outil médical innovant peu couteux. C'est ce processus de fabrication qu'on utilisera, à partir duquel des matériaux sont déposés couche par couche pour obtenir un objet tridimensionnel à partir d'un fichier de conception assistée par ordinateur (CAO) [17]. Ce processus diffère des méthodes traditionnelles telles que la fabrication soustractive, où l'objet est découpé dans un bloc de matériau plus grand. Au contraire, plutôt que d'enlever du matériel, le processus de fabrication additive ajoute des matériaux pour concevoir un objet [18]. Pour cela, la fabrication additive utilise une grande variété de techniques et de technologies qui s'applique à des familles de matériaux très diverses. Parmi ces matériaux on retrouve notamment les plastiques, les métaux, les céramiques et les biomatériaux dont nous parlerons plus loin dans cette partie. L'impression 3D de polymères en plastique sera utilisée comme c'était le cas pour l'impression de modèles de planification chirurgicale [19]., d'outils chirurgicaux [20]., de prothèses, de greffons artificiels, d'organes [21].

III.4. Test des prototypes

Afin de tester les deux prototypes réalisés, nous avons établi un protocole de scan pour le traitement des données collectés.

III.4.1. Scan par le prototype de photogrammétrie

Nous avons choisi de concevoir pour un premier test une attelle pour la main. Pour cela, l'utilisateur doit placer sa main à l'intérieur de la chambre de scan, des photos seront prise en rotation. Les photos seront envoyées sur le PC dans un dossier désigné.



Figure III.3 Photos prise en rotation lors de scan par photogrammétrie.

L'utilisateur doit prendre plus de photos sous différents angles. Ces photos seront insérées dans l'application Meshroom.

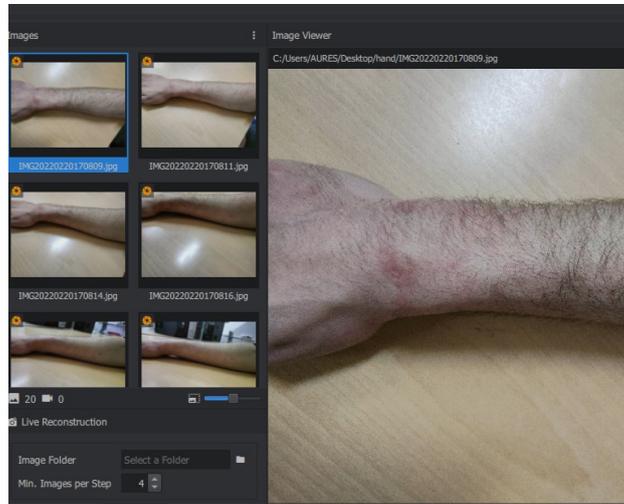


Figure III.4 L'insertion des images dans MESHROOM.

Le nombre minimum de photos est de 24 pour assurer une meilleure qualité. L'application Meshroom permet un rendu en 3D automatiquement en formant un nuage de points, qui a besoin d'être poli.

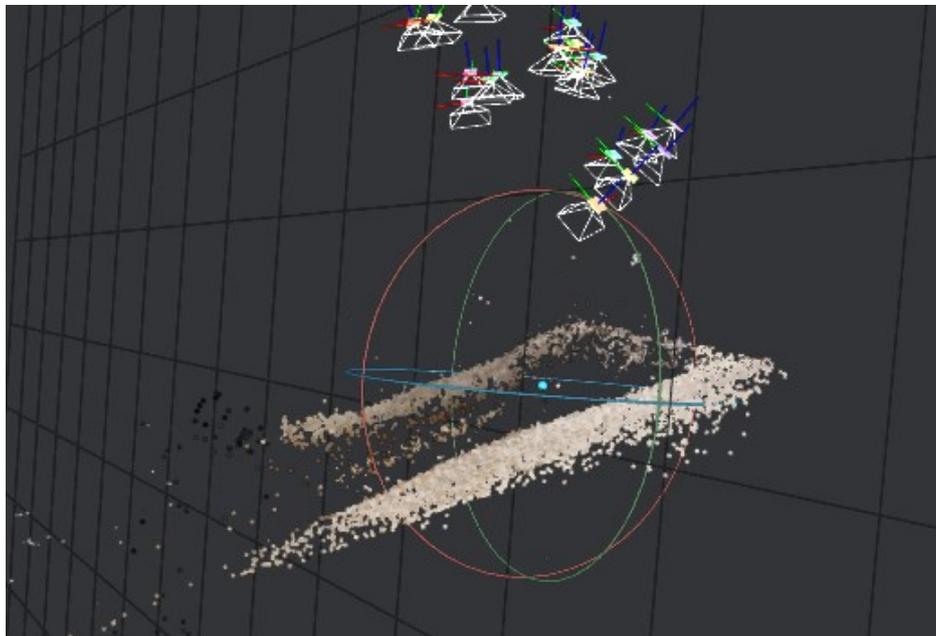


Figure III.5 Nuage de points formé sur MESHROOM.

Pour affiner et corriger ces résultats, nous transférons notre modèle dans Blender pour le polir et supprimer l'arrière-plan et tout le reste.

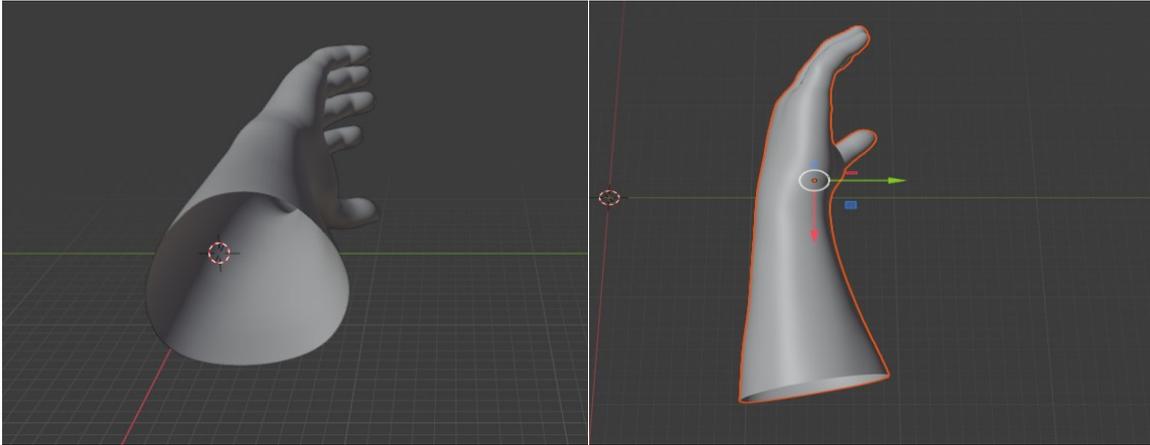


Figure III.6 Résultats après polissage sur BLENDER.

Pour créer une attelle sur mesure par rapport au scan, nous avons utilisé le diagramme VORONOI pour créer le casting

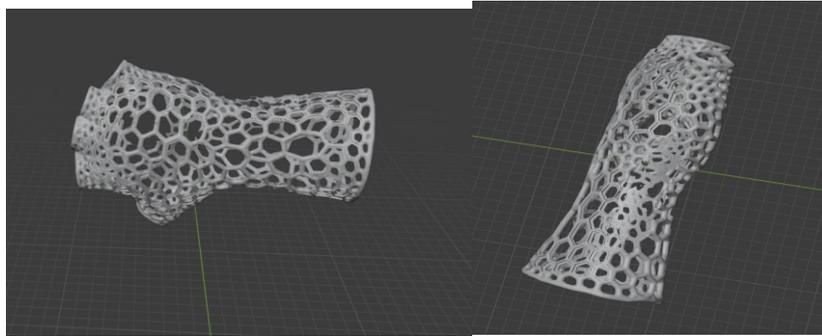


Figure III.7 Attelle après l'insertion de l'algorithme de VORONOI.

Ce modèle d'attelle sera enregistré dans le format d'un fichier STL pour pouvoir l'imprimer en 3D. Sachant que l'imprimante 3D utiliser ne peut imprimer de grands volumes (10 X15X15 cm), nous étions obligés de subdiviser l'attelle en plusieurs objets. La figure III 8 montre les quatre parties de l'attelle imprimées par le matériau PLA.

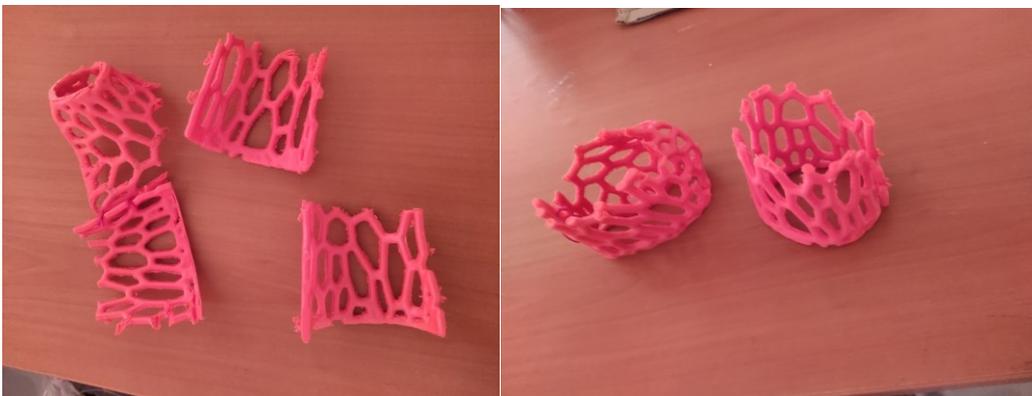


Figure III.8 Attelle 3D subdivisée après impression 3D.

Nous avons noté qu'il est nécessaire d'avoir un repère de mesure pour avoir une précision de l'attelle qui demeure un inconvénient majeur de cette méthode de scan. Donc, nous avons utilisé les mesures du contour du poignet pour ajuster la taille de l'attelle.

III.4.2. Scan par le prototype LiDAR

Ce prototype a été fabriqué des objets en rotation. Donc, nous ne pouvons scanner une main toute seule. Par contre nous pouvons scanner le torse humain pour en faire des corsets de scoliose. Cela nécessitera un prototype beaucoup plus grand avec des moteurs plus puissants pouvant faire tourner l'humain. Pour tester le fonctionnement de ce dispositif, nous avons établi une rotation complète de l'objet pour chaque monté de 1 mm. Cette monté peut être ajustée en fonction du temps et de la précision de la mesure. Les informations seront collectées via la carte mémoire puis seront injectées vers MESH LAB.

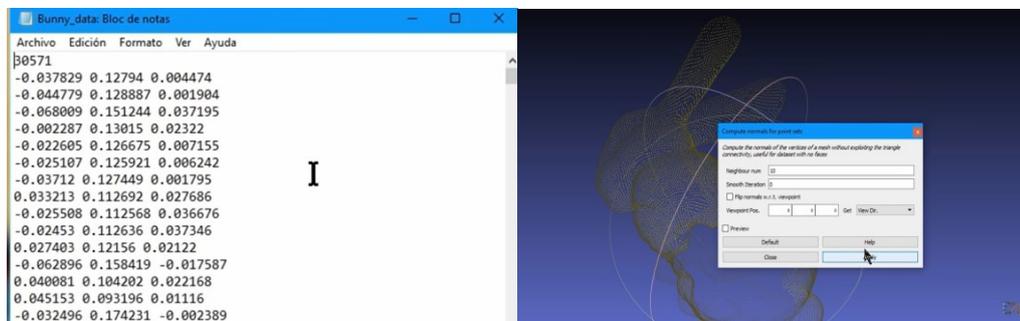


Figure III.9 Mesures de nuage de points par le scan LiDAR.

Ces données seront transférées puis traitées sur blender.

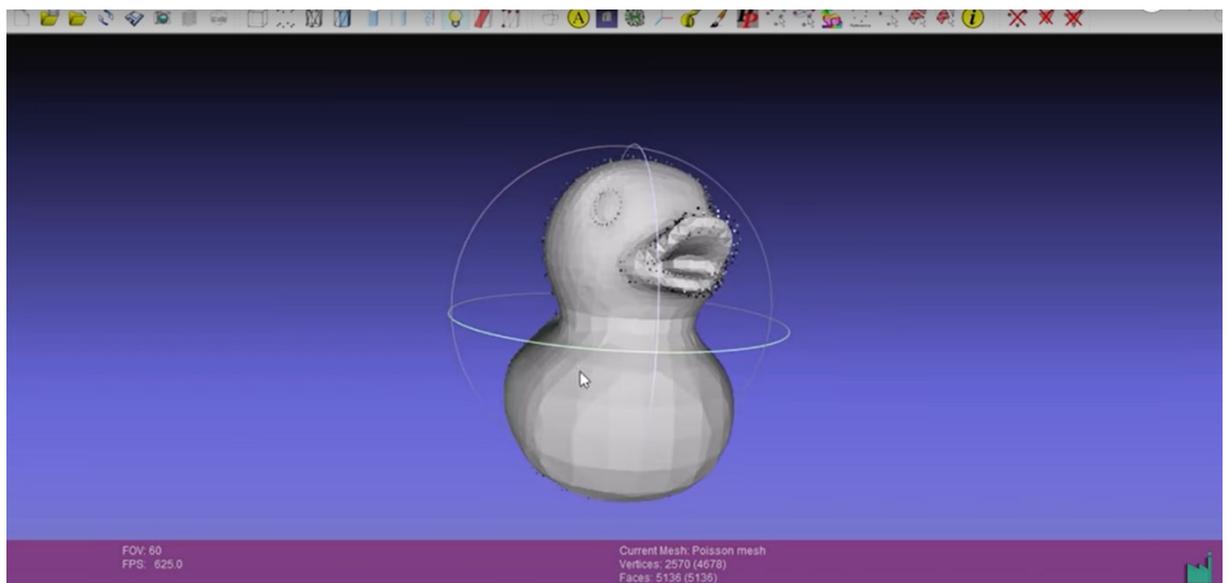


Figure III.10 Scan LiDAR d'un petit joué et imprimé en 3D.

Cette méthode donne beaucoup plus de précisions que la méthode précédente.

III.5. Comparaison entre scan 3D photogrammétrie et Lidar

Ces résultats nous ont permis de comparer ces deux méthodes de scan à savoir le LiDAR et la photogrammétrie.

LIDAR	PHOTOGRAMMÉTRIE
Précision inférieure à 90-95%	Précision très faible nécessitant un point de repère
Capteurs laser coûteux	Peut utiliser un appareil photo d'un simple smartphone
Fonctionne même si la lumière est incohérente (lumière de nuit et de jour)	Besoin d'une lumière intense
Nécessite des composants et des capteurs sophistiqués	Nécessite juste un smartphone
Fournir juste la forme de l'objet scanné	Fournir la texture de l'objet scanné
Fournit des détails sur l'objet scanné	Détails ne sont pas visibles dans le modèle 3d
Faible taux d'erreur	Taux d'erreur élevé

Tableau III.1 Comparaison entre le scanner LiDAR et photogrammétrie.

Le tableau montre que LiDAR est le prototype à développer dans le futur pour une meilleure précision pour la réalisation d'attelles orthopédique. Ce prototype doit être perfectionné avec des moteurs plus puissants pour tourner autour d'objets plus volumineux.

III.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une application direct de scan 3D pour l'étude d'attelle orthopédique. Nous avons détaillé les protocoles de test des deux méthodes pour d'extraction de données. Nous avons montré qu'il est possible de faire des attelles de main à l'aide du

prototype de photogrammétrie. Mais ce dispositif a un inconvénient majeur qui est la précision. Le scan LiDAR comble cet inconvénient mais pour le scan du corps humain il nécessite des moteurs plus puissants.

Conclusions et perspectives

La technologie qui transforme les images 2d en images 3d a connu une évolution extrême ces dernières années, depuis les grands scanners laser 3d jusqu'aux drones qui peuvent scanner des bâtiments entiers. Dans ce travail, nous avons adopté deux méthodes qui sont : photogrammétrie comme méthode passive et LIDAR comme méthode active.

La photogrammétrie est la technique qui consiste à prendre plusieurs photos sous différents angles et différents points de vue avec un simple appareil photo comme celle d'un smartphone et de les transformer en un modèle 3D. Le LiDAR consiste à prendre des mesures précises d'un point à l'aide d'un détecteur laser. Le capteur se déplace et prend la mesure d'un point à un autre point jusqu'à ce que nous générions un nuage de points pour obtenir un objet 3D. Nous avons établi un prototype pour chaque méthode choisie. Cela, nous a permis d'évaluer les deux technologies en fonction des applications et de donner leurs limites. Pour les parties logicielles, nous avons travaillé avec plusieurs programmes qui nous ont permis d'atteindre une plus grande précision et de meilleurs résultats.

Le but de notre projet est d'appliquer cette technologie dans le domaine médical et nous nous sommes concentrés sur le moulage de l'attelle de la main et le corset de scoliose. L'ancien concept avait beaucoup de problèmes (le prix, la chaleur, les irritations de la peau, même le cancer). Avec notre solution, nous avons éliminé la plupart de ces problèmes, le prix est moins cher, l'air peut circuler vers la peau et le matériau utilisé n'a pas d'effet sur la peau en général. Pour cela, nous aurons besoin de solutions d'impression 3D des données 3D collectées par nos scanners. L'impression 3D est en pleine essor dans le domaine de la santé. Cette technologie s'implante dans les hôpitaux les plus réputés partout au monde et dans plusieurs hôpitaux pédiatriques à l'étranger. L'impression 3D représente une opportunité par ce projet d'utiliser une technologie innovante permettant d'améliorer l'efficacité et la qualité des soins particulièrement en orthopédie. Ce projet est de numériser en 3D l'anatomie du patient afin de concevoir des attelles virtuellement et de planifier les reconstructions 3 de ces attelles. Cette reconstruction numérique fera appel d'exécuter des analyses multiphysiques 3D précises en utilisant la méthode des éléments finis pour un suivie sur mesure des forces générées par les attelles.

Grâce à l'outil de modélisation comme Comsol multiphysiques, nous le gérons avec une importation et un maillage spécifique pour sécuriser les performances du corset par rapport aux pressions et forces d'ouverture. Nous viserons d'étudier avec un partenaire socio-économique de cas des attelles anatomiques des bras, mains, et pieds et une dizaine attelles de cas de corset de scoliose.

Références

- [1] Thomas T, Lu ;Tien-Hsin Chao;. A high-resolution and high-speed 3D imaging system and its application on ATR.
- [2] Goyer, G. G.; R. Watson (September 1963). the laser and its Application . *Bulletin of the American Meteorological Society*. 44 (9): 564–575 [568].
- [3] Yasutaka ,F; Brian,C; Steven M; Seitz ,Richard Szeliski;. Towards Internet-scale Multi-view Stereo.
- [4] Lundstrom, T; Baqersad, Javad; Niezrecki, Christopher (1 January 2013). "Using High-Speed Stereophotogrammetry to Collect Operating Data on a Robinson R44 Helicopter". *Special Topics in Structural Dynamics, Volume 6*. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, New York, NY. pp. 401–410.
- [5] Sužiedelytė,V; Jūratė;. (1 March 2013)."Accuracy analysis of measuring close-range image points using manual and stereo modes". *Geodesy and Cartography*. 39
- [6] Hesse, Falk & Comunian, Alessandro & Attinger, Sabine. (2019). What We Talk About When We Talk About Uncertainty. Toward a Unified, Data-Driven Framework for Uncertainty Characterization in Hydrogeology. *Frontiers in Earth Science*. 7. 10.3389/feart.2019.00118.
- [6] Monush, Barry; Sheridan, James (June 1, 2011). *Lucille Ball FAQ: Everything Left to Know About America's Favorite Redhead*. Applause Theatre & Cinema. ISBN 9781557839336. Retrieved December 22, 2014.
- [7] *Begley, Adam (11 July 2017)*. The Great Nadar: The Man Behind the Camera. *New York: Tim Duggan Books*. ISBN 978-1-101-90260-8.
- [8] Albrecht Meydenbauer: *Die Photometrographie*. In: *Wochenblatt des Architektenvereins zu Berlin* Jg. 1, 1867, Nr. 14, S. 125–126 ; Nr. 15, S. 139–140 ; Nr. 16, S. 149–150 .
- [9] Gopal ,S;. Google Earth's Incredible 3D Imagery, Explained, 2017-04-18
- [10] Klaus ,H;.Accuracy Study Project of Eos Systems' PhotoModeler ;.University of Innsbruck, Austria; 1995.

[11] **Como Lidar com as Preocupações: Sete Passos Para Impedir que Elas Paralisem**

Você

[12] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Lidar-page-2.html>

- [13] <https://www.generationrobots.com/blog/fr/quelles-applications-pour-les-lidar>.
- [14] LiDAR Remote Sensing and Application
- [15] <https://www.interviewbit.com/blog/arduino-vs-raspberry-pi/>
- [16] S.V.D.Reyvanth, G.Shirish, « PID controller using Arduino ».]
- [17] S. Landrault, H Weisslinger « Arduino : Premiers pas en informatique embarquée » Juin 2014.
- [18] Jean-Noël Montagné, « Initiation à la mise en oeuvre matérielle et logicielle de l'Arduino » Centre de Ressources Art Sensitif novembre 2006.
- [19] Lal H, Patralekh MK. 3D printing and its applications in orthopaedic trauma: A technological marvel. *J Clin Orthop Trauma*. 2018 Jul-Sep;9(3):260-268. doi: 10.1016/j.jcot.2018.07.022. Epub 2018 Aug 3. PMID: 30202159; PMCID: PMC6128305.
- [16](Wong et al., 2017a)..
- [20] Huotilainen E, Paloheimo M, Salmi M, Paloheimo K-S, Bjorkstrand R, Tuomi J, et al. Imaging requirements for medical applications of additive manufacturing. *Acta Radiologica* 2014;55(1):78-85. Blais S. Exploration du potentiel d'impression 3D en santé; études de cas au CHU Sainte-Justine. CHU Sainte-Justine; 2017.
- [21] Adolphs, N., et al. (2014). "RapidSplint: virtual splint generation for orthognathic surgery - results of a pilot series." *Comput Aided Surg* 19(1-3): 20-28.
- [22] Core-Baillais M, Bensoussan H, Richardot A, Kusnadi H. The state of 3D printing Sculpteo; 2017. Chen H, Gabriel M. A Roadmap from Idea to Implementation: 3d Printing for Presurgical Application; Operational Management for 3d Printing in Surgery: CreateSpace Independent Publishing Platform; 2016.
- [23] Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomedical engineering online*. 2016;15(1):115
- [24] Mitsouras D, Liacouras P, Imanzadeh A, Giannopoulos AA, Cai T, Kumamaru KK, et al. Medical 3D Printing for the Radiologist. *Radiographics*. 2015;35(7):1965-88.

