

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Supérieure Vétérinaire



Domaine : Sciences de la nature et de la vie  
Filière : Sciences vétérinaires

# Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master  
en  
Médecine vétérinaire  
**THEME**

## Etude comparative entre un os obtenu par impression 3D et son modèle original

Présenté par :

Mr. MAROUF Noufel Ouail  
Mr. BENCHABANE Aymene

Soutenu publiquement, le 18 Novembre 2020 devant le jury :

Mme HACHEMI Amina	MCB (ENSV)	Présidente
Mme BAAZIZI Ratiba	MCA (ENSV)	Examinatrice
Mme MIMOUNE Nora	MCA (ENSV)	Promotrice

## **Déclaration sur l'honneur**

Je soussigné, MAROUF NOUFEL OUAIL, déclare être pleinement conscient que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés. Sous toute forme de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

Signature

## **Déclaration sur l'honneur**

Je soussigné, BENCHABANE AYMENE, déclare être pleinement conscient que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés. Sous toute forme de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

Signature

## **Remerciement :**

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mme MIMOUNE NORA pour son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nous tenons à remercier :

Mm HACHEMI Amina, MCB à l'école nationale supérieure vétérinaire d'Alger, d'avoir bien voulu accepter de présider le jury.

Mm BAAZIZI Ratiba, MCA à l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alger pour avoir bien voulu examiner notre travail.

À nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

## Sommaire

INTRODUCTION.....	8
PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE .....	9
<b>I. PROCESSUS GENERAL.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Définition de l'impression 3D.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Processus général.....</b>	<b>9</b>
2.1. Acquisition d'image .....	9
<b>2.2. Traitement des images .....</b>	<b>11</b>
2.2.1. Segmentation .....	12
<b>2.2.2. Conversion DICOM à STL.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.3. Optimisation .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3. Impression .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4. Post-traitement .....</b>	<b>14</b>
3. Présentation des principales technologies d'impression en 3 dimensions .....	14
3.1. La stéréolithographie (SLA).....	15
3.1.1. Définition et principe .....	15
3.1.2. Les différents matériaux utilisables.....	15
3.1.3. Les avantages .....	16
3.1.4. Les inconvénients .....	16
3.2. Frittage sélectif par laser (SLS).....	16
3.2.1. Définition et principe .....	16
3.2.2. Les différents matériaux utilisables.....	17
3.2.3. Les avantages .....	17
3.2.4. Les inconvénients .....	18
3.3. Modélisation par dépôt de fil en fusion (FDM) .....	18
3.3.1. Définition et principe .....	18
3.3.2. Les différents matériaux utilisables.....	18
3.3.3. Avantages .....	19
3.3.4. Les inconvénients .....	19
3.4. L'impression 3 dimension (3DP) .....	19
3.4.1. Définition et principe .....	19
3.4.2 Les différents matériaux utilisables.....	20
3.4.3. Les avantage .....	20
3.4.4. Les inconvénients .....	20

<b>II. MODELES ANATOMIQUES IMPRIMES EN 3D POUR L'APPRENTISSAGE DE L'ANATOMIE</b> .....	22
DEUXIEME PARTIE : Partie Expérimentale .....	26
I. Objectif.....	26
<b>II. MATERIELS ET METHODE</b> .....	26
1. Choix de l'échantillon .....	26
2. Nettoyage et blanchissement de l'os .....	27
3. L'impression de l'os synthétique .....	30
3.1. L'acquisition de l'image ou la numérisation.....	30
3.2. L'impression .....	31
3.3. Post-traitement .....	31
4. Etude comparative.....	32
III. RESULTATS .....	33
DISCUSSION .....	35
CONCLUSION .....	37

## **LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES**

- Page 10 Figure 1 : Dimensions et précision anatomique: objectifs cliniques (boîtes bleues), modalités d'imagerie (étiquettes grises fanées).
- Page 12 Figure2 : Post-traitement des images de tomодensitométrie avec contraste de l'aorte abdominale.
- Page 14 Figure3 : Courte liste des logiciels courants utilisés pour le flux d'impression 3D.
- Page 15 Figure 4 : Schéma d'une imprimante de stéréolithographie.
- Page 17 Figure 5 : Schéma d'une impression 3D type frittage sélectif par laser.
- Page 18 Figure 6 : Schéma de fonctionnement de Modélisation par dépôt de fil en fusion.
- Page 20 Figure 7 : Schéma représente une imprimante 3D.
- Page 23 Figure 8 : vue dorsale du fémur de la vache adulte. A : spécimen d'os, B : modèle numérique, C : modèle imprimé en 3D.
- Page 25 Figure 9 : Le modèle du pied équin imprimé en 3D. A entièrement assemblé et B avec la capsule de sabot enlevée.
- Page 27 Figure 10 : Fémur gauche du mouton (Photo personnelle).
- Page 28 Figure 11 : Fémur après manipulation par la lame de bistouri (Photo personnelle).
- Page 28 Figure 12 : La deuxième étape (Photo personnelle).
- Page 29 Figure 13 : Résultat de la troisième étape (Photo personnelle).
- Page 29 Figure 14 : Début de l'étape de blanchissement (Photo personnelle).
- Page 29 Figure 15 : Fémur après blanchissement (Photo personnelle).
- Page 30 Figure 16 : Ecran d'accueil du logiciel GEOMAGIC après la numérisation (Photo personnelle).
- Page 31 Figure 17: L'imprimante 3D SLS Spro60 HD 3DSystem (Photo personnelle).
- Page 32 Figure 18 : Etape du post-traitement (Photo personnelle).

Page 33 Figure 19 : Prise de mesure de la largeur de l'épiphyse proximale de fémur. A : os biologique. B : modèle numérique. C : os imprimé en 3D (Photo personnelle).

Page 34 Figure 20 : Fémur imprimé en 3D. A : vue crânial. B : vue caudal (Photo personnelle).

Page 34 Tableau 1: Tableau comparatif du fémur ovin.

## LISTE DES ABREVIATIONS

AM: additive manufacturing.

3D: tridimensionnel.

CAO : Conception assistée par ordinateur.

CAD: computer-aided design.

DICOM: Digital Imaging and Communications in Medicine.

TDM: tomodensitométrie.

IRM : imagerie par résonance magnétique.

ROI: regions of interest ou région d'intérêt.

Format SLS: stereolithography.

SLS: Frittage sélectif par laser.

SLA: stereolithography.

FDM: Modélisation par dépôt de fil en fusion.

3DP : L'impression 3 dimension.

STL: Standard Tessellation Language.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

AMF: additive manufacturing format.

PACS: Picture Archiving and Communication System.

GE: General Electric.

CAS: Computer Assisted Surgery.

PA: polyamide.

## Résumé

L'impression en 3 dimensions, apparue dans les années 1980 et en constante évolution depuis, est une technologie innovante et très prometteuse. En effet, par son procédé unique d'ajout de matière couche par couche, elle se démarque des processus classiques de modélisation par moulage et retrait de matière. Cette modélisation par addition de matière permet à l'impression en 3 dimensions de pouvoir créer des objets avec des géométries très complexes et avec une précision encore jamais égalée. Cette dernière qualité permet à l'impression en 3 dimensions d'être utilisée dans de nombreux domaines.

Plus spécifiquement, au sein de la médecine vétérinaire l'impression en 3 dimensions peut faire une entrée remarquable dans l'ostéologie et l'anatomie voire l'éducation en général. En effet, grâce aux imprimantes, il est possible d'imprimer des pièces anatomiques complètes et en de nombreux exemplaires. Cependant, il est de plus en plus difficile de se procurer des pièces anatomiques que ce soient pour des raisons éthiques, sanitaires ou financières. De plus, la conservation de ces pièces est difficile et demande l'utilisation de produits toxiques voire cancérigènes.

Nous nous proposons de mener une expérience sur l'impression en 3 dimensions en comparant la géométrie de pièces anatomiques réelles et imprimées. Au-delà, d'une simple comparaison, il s'agit plus d'apprendre à utiliser l'impression en 3 dimensions et de pouvoir tester une des applications de cette technologie, l'impression de modèles anatomiques à visée pédagogique.

**Mots-clés :** Impression en 3 dimensions, anatomie, intérêt pédagogique, ostéologie.

## ABSTRACT

3-dimensional printing, which appeared in the 1980s and has been constantly evolving since, is an innovative and very promising technology.

Indeed, by its unique process of adding material layer by layer, it stands out from the classic modeling processes by molding and material removal. This modeling by adding material allows 3-dimensional printing to create objects with very complex geometries and with unprecedented precision. This latter quality allows 3-dimensional printing to be used in many areas.

More specifically, within veterinary medicine, 3-dimensional printing can make a remarkable entry into osteology and anatomy and even education in general. Indeed, thanks to printers, it is possible to print complete anatomical parts and in numerous copies. However, it is more and more difficult to obtain anatomical parts, whether for ethical, health or financial reasons. In addition, the conservation of these pieces is difficult and requires the use of toxic or even carcinogenic products.

We propose to conduct an experiment on 3-dimensional printing by comparing the geometry of real and printed anatomical parts. Beyond a simple comparison, it is more about learning to use 3-dimensional printing and being able to test one of the applications of this technology, the printing of anatomical models for educational purposes.

**Keywords:** 3-dimensional printing, anatomy, educational interest, osteology.

## ملخص

تعد الطباعة ثلاثية الأبعاد ، التي ظهرت في الثمانينيات وما فتئت تتطور باستمرار منذ ذلك الحين ، تقنية مبتكرة وواعدة للغاية.

في الواقع ، من خلال عملياتها الفريدة المتمثلة في إضافة طبقة مادة بطبقة ، فإنها تبرز من عمليات النمذجة الكلاسيكية عن طريق الصب وإزالة المواد. تسمح هذه النمذجة بإضافة مادة بطباعة ثلاثية الأبعاد لإنشاء كائنات ذات أشكال هندسية معقدة للغاية وبدقة غير مسبوقة. تسمح هذه الجودة الأخيرة باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد في العديد من المجالات.

وبشكل أكثر تحديداً ، في الطب البيطري ، يمكن للطباعة ثلاثية الأبعاد أن تدخل بشكل ملحوظ في علم العظام وعلم التشريح وحتى التعليم بشكل عام. في الواقع ، بفضل الطابعات ، من الممكن طباعة أجزاء تشريحية كاملة وبنسخ عديدة. ومع ذلك ، تزداد صعوبة الحصول على القطع التشريحية ، سواء لأسباب أخلاقية أو صحية أو مالية. بالإضافة إلى ذلك ، فإن الحفاظ على هذه القطع أمر صعب ويتطلب استخدام منتجات سامة أو حتى مسببة للسرطان.

نقترح إجراء تجربة على الطباعة ثلاثية الأبعاد من خلال مقارنة هندسة الأجزاء التشريحية الحقيقية والمطبوعة. إلى جانب المقارنة البسيطة ، يتعلق الأمر أكثر بتعلم استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد والقدرة على اختبار أحد تطبيقات هذه التقنية ، وهو طباعة النماذج التشريحية للأغراض التعليمية.

الكلمات المفتاحية: الطباعة ثلاثية الأبعاد ، علم التشريح ، الاهتمام التربوي ، علم العظام.

## **INTRODUCTION**

La dissection cadavérique considérée comme l'étalon-or pour l'apprentissage de l'anatomie. Bien que l'enseignement théorique de l'anatomie soit extrêmement important, des études pratiques sont essentielles pour solidifier les aspects théoriques. Malheureusement, il existe des obstacles tels que le coût et la disponibilité qui empêchent l'acquisition et la préparation faciles des spécimens anatomiques, pour cela l'utilisation des spécimens d'animaux réels dans l'enseignement anatomique vétérinaire a diminué au cours des dernières décennies. Actuellement, de nombreuses universités s'appuient sur l'utilisation des livres à deux dimensions, des images et des informations écrites. Un tel enseignement a été fortement associé à une augmentation préjudiciable de la charge cognitive menant à une diminution de l'acquisition de connaissances chez les élèves ayant de faibles compétences spatiales (Daniela et al 2019 ; Daniel el al 2013 ; Fangzheng 2017).

Certaines études essaient de fabriquer des modèles à la main, mais ils trouvent que la fabrication à la main de ces modèles prend beaucoup de temps et qu'il est impossible d'être certain que vos modèles sont exacts (Epps et al 2015). En revanche, l'utilisation de la numérisation et de l'impression 3D pour la production des modèles anatomiques est un outil innovant. Grace à cette technologie des nouvelles méthodes d'enseignement de l'anatomie vétérinaire, telles que la simulation (modèles informatiques 3D) et les modèles osseux imprimés en 3D offrent des alternatives utiles et agréables aux étudiants vétérinaires (Fangzheng 2017 ; Daniela et al 2019).

Afin de mener à bien cette étude, les technologies utilisées seront décrites dans une première partie puis un scanner de surface et une imprimante 3D ont été utilisées pour produire un modèle squelettique du membre pelvien d'un mouton (fémur droit), qui sera étudiée afin de juger sa haute-fidélité par rapport au modèle original. Enfin, une discussion autour de la validité de ce modèle comme outil pédagogique pour l'éducation de l'ostéologie sera menée.

# **PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **I. PROCESSUS GENERAL**

### **1. Définition de l'impression 3D**

Depuis sa création en 1986, la fabrication additive (additive manufacturing *ou* AM), couramment appelée l'impression 3D ou la fabrication rapide (rapidmanufacturing), est une méthode qui permet la fabrication d'un objet physique selon un modèle de conception assistée par ordinateur (CAO) tridimensionnel (3D) (en anglais, computer aided design ou CAD).

Il existe plusieurs technologies d'impression 3D parmi lesquels nous citons les plus utilisées : la stéréolithographie, Frittage sélectif par laser, Modélisation par dépôt de fil en fusion, L'impression 3 dimension (Mitsouras D et al 2015).

### **2. Processus général**

Le processus général de l'impression 3D se sépare en quatre étapes pour tous les types d'industrie : conception d'un objet CAD ou acquisition d'images, traitement du fichier, l'impression et le post-traitement. Puisque ce rapport s'inscrit dans le contexte hospitalier, le départ de ce processus sera presque exclusivement l'acquisition d'images médicale DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) (Mitsouras D et al 2015 ; Chen H et al 2016).

#### **2.1. Acquisition d'image**

Pour les applications médicales, les images médicales représentent le point de départ. Les types d'imagerie priorisés sont des coupes transversales permettant une reconstruction 3D. Les plus fréquemment utilisées sont la tomodensitométrie (TDM) en raison du large éventail d'applications et de la relative facilité de post-traitement des images et l'imagerie par résonance magnétique (IRM). On retrouve aussi parfois les ultrasons 3D, l'IRM fœtale et l'angiographie. L'imagerie médicale est traditionnellement réalisée pour deux objectifs principaux: à des fins de diagnostic et de planification préopératoire. Le premier objectif est souvent atteint par une imagerie «qualitative» ou fonctionnelle, alors que le second peut nécessiter une image plus précise, Lorsqu'un chirurgien fait sa planification chirurgicale, une imagerie qualitative n'est

pas suffisante on nécessite plutôt une meilleure précision et souvent une reconstruction 3D. (Huotilainen et al 2014 ; Chen H et al 2016 ; Mitsouras D et al 2015).

La figure 1 illustre trois objectifs cliniques distincts : l'imagerie diagnostique, la planification préopératoire et la conception d'implants par AM, sur deux axes. La position verticale indique la tridimensionnalité de l'image pour chaque application, tandis que la position horizontale décrit la nécessité d'une précision anatomique exacte.

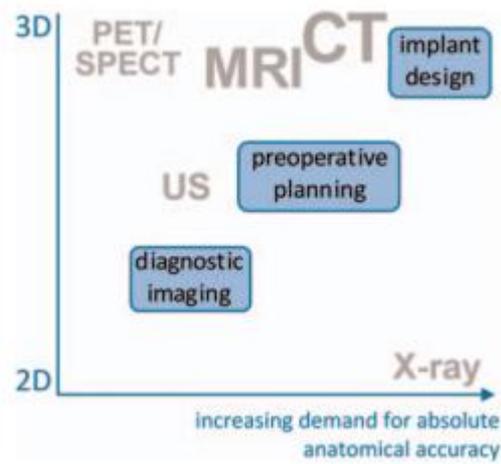


Figure 1 : Dimensions et précision anatomique: objectifs cliniques (boîtes bleues), modalités d'imagerie (étiquettes grises fanées). (Huotilainen et al 2014)

L'imagerie par ultrasons (US) se situe entre la 2D et la 3D car son nombre de dimensions dépend du mode de fonctionnement choisi: le mode A est 1D, le mode B est 2D, mais la 3D est également disponible. (Huotilainen et al 2014)

Finalement, les rayons X peuvent atteindre d'excellentes résolutions mais au coût du contraste. On peut remarquer que comparativement aux modalités principales, seuls les IRM et TDM répondent au besoin de la planification opératoire et le design d'implant. L'IRM est la deuxième modalité la plus importante. Son avantage est qu'il s'agit d'une modalité non-ionisante et qu'elle offre un meilleur contraste des tissus mous (Mitsouras D et al 2015 ; Chen H et al 2016).

Si l'équipe chirurgicale envisage d'utiliser l'impression 3D pour la planification chirurgicale, un protocole d'imagerie approprié devient la première étape critique. Selon (Chen H et al 2016), l'épaisseur axiale optimale des tranches dépend en grande partie de la structure anatomique d'intérêt et devrait avoisiner les 1 mm à 2 mm alors que (Mitsouras D et al 2015). Suggèrent une épaisseur entre 0.25 et 1.25 mm. Il est toujours possible de construire un objet 3D en utilisant une épaisseur de coupe supérieure à 2 mm mais il manquera beaucoup d'informations anatomiques et les cliniciens doivent être conscients du degré d'inexactitude de l'impression finale.

Si l'impression 3D est envisagée dans le cadre de la planification préopératoire, il est important de consulter un radiologue avant l'acquisition de l'image pour obtenir des résultats optimaux (Chen H et al 2016 ; Mitsouras D et al 2015).

L'utilisation de l'ultrasonographie 3D pour la fabrication additive médicale figurait parmi les premières propositions. Bien qu'elle ne soit généralement pas une modalité à prioriser, elle est un choix acceptable pour des applications prénatales pour des raisons sécuritaires (Mitsouras D et al 2015).

Une approche d'imagerie hybride, une combinaison d'une modalité de médecine nucléaire avec une autre modalité à haute résolution (IRM, TDM), peut être envisagée pour avoir une représentation anatomique juste (Gillaspie et al 2016).

Par contre si l'impression 3D est utilisée à des fins pédagogiques comme la fabrication des os l'acquisition d'image ce fait par un scanner de surface qui est intégré à l'imprimante et qui va nous donner directement une représentation 3D de l'objet scanné sur un logiciel, dans ce cas l'imagerie médical elle n'est pas nécessaire et même l'étape de traitement des images peuvent être négligé. On appelle ce processus la numérisation (Fangzheng et al 2017 ; Epps et al 2015 ; Daniela et al 2019)

## **2.2. Traitement des images**

Le traitement des images suit trois étapes de base : la segmentation, la conversion et l'optimisation du fichier (Chen H et al 2016).

### 2.2.1. Segmentation

La segmentation est un processus au cours duquel on sélectionne une région particulière d'intérêt clinique sur chaque image axiale pour créer une reconstruction 3D (figure2). Cette région d'intérêt ROI (regions of interest) peut être une structure anatomique complexe ou une pathologie particulière nécessitant un traitement chirurgical.

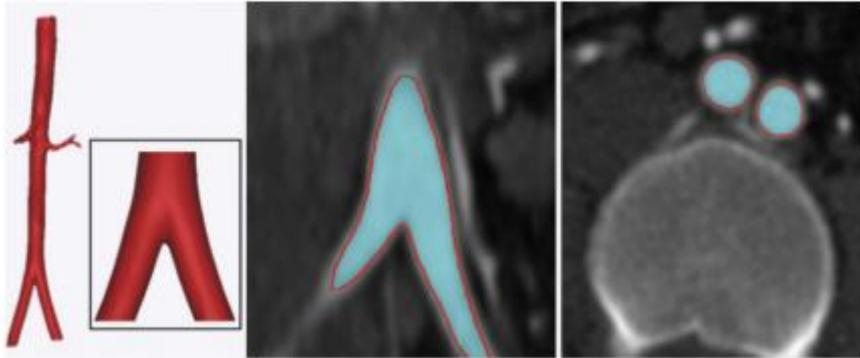


Figure2 : Post-traitement des images de tomodensitométrie avec contraste de l'aorte abdominale (Mitsouras D et al 2015).

Cette étape est nouvelle pour les radiologues et nécessite généralement des logiciels spécialisés (Figure 3) et des compétences principalement utilisées dans les applications d'ingénierie. Ceci peut se faire de manière semi-automatique ou manuelle. Les praticiens utilisent souvent une combinaison des deux pour obtenir un objet 3D final satisfaisant (Mitsouras D et al 2015 ; Chen H et al 2016 ; Tamir et al 2015 ; Eero Huotilainen et al 2013).

### 2.2.2. Conversion DICOM à STL

Toutes les images médicales actuelles sont de format DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). La plupart des imprimantes 3D ne reconnaissent cependant que certains formats de fichier, le plus souvent des fichiers SLS (stereolithography) ou STL (Standard TessellationLanguage). Ces formats sont des interfaces entre les logiciels 3D et les imprimantes 3D. Dans ces formats la représentation d'un objet 3D segmenté se fait par des millions de triangles connectés appelée maillage, Les erreurs de maillage se produisent lorsque ces triangles sont à l'envers, se croisent ou lorsqu'ils ont un certain nombre d'autres orientations ce qui va créer des discontinuités.

Le format STL a plusieurs limitations : aucune indication de couleur, de texture ou de matériau. Il existe quelques autres formats communs qui incluent la couleur : OBJ, WRL et ZPR. La résolution des technologies de fabrication additive s'est beaucoup améliorée au cours du temps. Ceci crée une problématique avec le format STL car les fichiers deviennent trop grands. Un standard ASTM (American Society for Testing and Materials) recommande l'implémentation d'un nouveau format pour la fabrication additive AMF (additive manufacturing format) ayant la capacité d'avoir plusieurs matériaux, plusieurs couleurs et des microstructures. Pour le moment, les fichiers STL continuent à être le standard de l'industrie.

Le PACS (système d'archivage et de transmission d'images, ou Picture Archiving and Communication System en anglais) c'est le Système d'informatique le plus utilisé aux hôpitaux qui permet d'assurer la saisie, la numérisation, l'affichage, le traitement, l'analyse et l'archivage d'images médicales numériques provenant de multiples techniques d'imagerie diagnostique. À l'heure actuelle, peu de PACS offrent l'option d'ouvrir les images dans le format STL. Une exception est le logiciel Osirix, un logiciel pour visualiser des images DICOM sur des produits Apple. Bien qu'il soit accepté dans les milieux universitaires, Osirix n'est pas disponible comme visualiseur standard dans la plupart des hôpitaux. Heureusement, les principaux fournisseurs de systèmes PACS tels que GE (General Electric) et Siemens mettent à jour leurs systèmes pour inclure cette fonctionnalité dans leurs futures versions. En outre, de nombreux logiciels sont disponibles pour effectuer la conversion et souvent la segmentation aussi (Tamir et al 2015 ; Chen H et al 2016 ; Mitsouras D et al 2015 ; Eero Huotilainen et al 2013).

### **2.2.3. Optimisation**

Le maillage doit être mathématiquement continu, cela signifie que l'objet doit avoir un intérieur et un extérieur continus (sans trous). Le processus d'optimisation d'un fichier STL implique la correction de discontinuités en essayant de conserver le plus de détails anatomiques possibles par un logiciel (Figure 3) avant que l'objet ne soit considéré comme prêt pour l'imprimante. Si ces discontinuités ne sont pas corrigées, l'impression 3D n'est pas possible. Le nombre de triangles doit aussi être optimisé. Si le fichier STL ne contient pas assez de triangles, des détails seront perdus. Par contre, un fichier STL contenant trop de triangles se traduira par une texture rugueuse (Mitsouras D et al 2015 ; Chen H et al 2016).

Software needed		
Segmentation and export	Edit mesh errors	3D computer planning, manipulate mesh, connect structures, etc.
1. Mimics (Materialise) 2. OsiriX (Mac only , free version) 3. Vitrea workstation (not thin client) 4. 3D slicer (Harvard) 5. Paid online service (Bespoke Modeling and Shapeways)	1. 3Matic or Magics (Materialise) \$ 2. Meshlab - free 3. NetFab - free	1. 3Matic, Magics or Surgicase (Materialise) 2. Blender (free) 3. 3D art programs such as Zbrush, Maya, Mudbox (autodesk)

Figure 3 : Courte liste des logiciels courants utilisés pour le flux d'impression 3D (Tamir et al 2015).

### 2.3. Impression

Cette étape va construire l'objet physique en fonction du maillage corrigé. L'impression représente une étape automatisée. La durée d'une impression dépend de la vitesse de l'imprimante, la grosseur de l'objet, la complexité, le remplissage et le nombre de couches.

Les différentes technologies seront décrites dans la suite du document (Chen H et al 2016).

### 2.4. Post-traitement

Il est souvent nécessaire de faire un post-traitement du produit. La nature de ce post-traitement est propre à chaque type de technologies. Ceci peut inclure d'enlever le matériau résiduel ou des structures de support, qui sont mis en place pour permettre l'impression. Les structures de support ne sont pas utilisées dans tous les types d'imprimantes. Pour certaines imprimantes, les structures du support sont nécessaires pour presque tout type d'impression. Pour d'autres technologies, elles ne sont pas systématiquement nécessaires.

Il peut être nécessaire de polir ou de sabler l'objet afin d'améliorer la texture de la surface (diminuer la rugosité). D'autres exemples de post-traitement sont la reconstruction (assembler des pièces séparées) et la coloration (Chen H et al 2016 ; Tamir et al 2015).

## 3. Présentation des principales technologies d'impression en 3 dimensions

Il existe à ce jour plusieurs modalités d'impressions 3D. Dans notre étude, nous avons choisi d'exposer les 4 modalités les plus utilisées :

## 3.1. La stéréolithographie (SLA)

### 3.1.1. Définition et principe

La stéréolithographie est le premier procédé d'impression en 3 dimensions ou fabrication par addition de matériel. Elle est inventée en 1986 par 3D Systems (Wendel et al. 2008). Le principe de la stéréolithographie repose sur la conversion d'une résine photosensible qui se solidifie grâce à une exposition sélective à des ultra-violets. Cette conversion se fait selon le principe de polymérisation (Figure 4) (des petites molécules réagissent entre elles pour former une molécule de masse molaire plus importante) (Guo, Leu 2013).

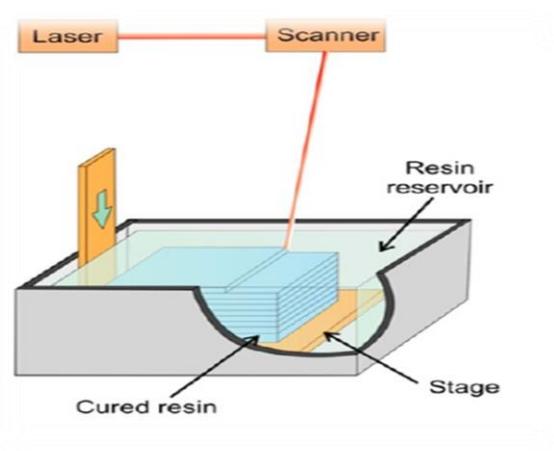


Figure 4 : Schéma d'une imprimante de stéréolithographie (Gross et al 2014).

### 3.1.2. Les différents matériaux utilisables

Cette technologie possède l'avantage de pouvoir utiliser une multitude de matériaux. Les plus courants sont des résines d'acrylique et d'époxy mais il est tout à fait possible d'obtenir des pièces métalliques ou en céramique en incorporant à la résine photosensible des particules de métal ou de céramique (Guo, Leu 2013). De nouveaux matériaux biocompatibles ont été développés avec des mélanges d'acrylate et d'hydroxyapatite ou d'acidehyaluronique et de polysaccharides permettant d'élargir le domaine d'utilisation de cette technologie (Arcaute ,2010).

### **3.1.3. Les avantages**

- Les pièces fabriquées peuvent être de taille importante, jusqu'à plus de deux mètres dans la plus grande dimension pour les plus grosses machines (Wendel et al. 2008).
- C'est un procédé rapide avec une grande précision et une finition parmi les meilleures des imprimantes en 3 dimensions (Temir et al 2015 ; Wendel et al. 2008).

### **3.1.4. Les inconvénients**

- Le temps de construction de la pièce est proportionnel à la taille de celle-ci, donc plus l'objet est de grande taille plus la durée de construction est long.
- La résine continue de se polymériser après le passage du faisceau laser et absorbe de l'humidité, ce qui entraîne des distorsions de la pièce (Kamrani et al 2010).
- Le durcissement post-impression dans un four est parfois nécessaire pour durcir la résine. Certaines résines perdent leur stabilité avec le temps et deviennent fragiles (Temir et al 2015).

## **3.2. Frittage sélectif par laser (SLS)**

### **3.2.1. Définition et principe**

Le frittage sélectif par laser (SLS) a été développé par Carl Deckard et Joseph Beaman dans le département génie mécanique de l'Université de Texas. Le SLS est une méthode de fabrication de modèle 3D à base de poudre, aboutit à une polymérisation puis solidification de la poudre aux endroits sélectionnés. Ce procédé utilise un laser infra rouge de forte puissance dirigé par un système optique vers l'endroit désiré pour le frittage sur la poudre placée au niveau de la cuve de l'imprimante sur un plateau mobile selon l'axe vertical afin de générer un modèle 3D (Figure 5) (Gross et al 2014).

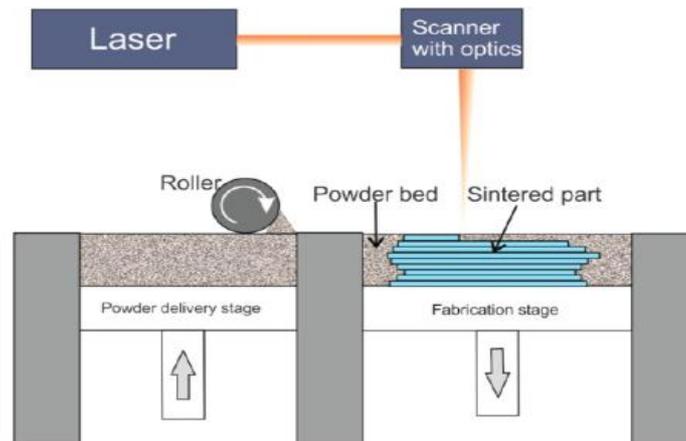


Figure 5 : Schéma d'une impression 3D type frittage sélectif par laser (Gross et al 2014).

### 3.2.2. Les différents matériaux utilisables

Dans ce type de prototypage SLS un grand nombre de matériaux peuvent être utilisés à partir de polymères tels que polyamide, polycarbonate (PC), polyvinyl chlorure (PVC), acrylonitrile butadiène styrène (ABS), nylon, résine et polyester, poudres métalliques et céramiques (Gross et al 2014). Il est possible d'utiliser des poudres composées de plusieurs matériaux comme par exemple des mélanges de particules métalliques (titane et acier étant les plus communs) (Guo, Leu 2013).

### 3.2.3. Les avantages

-L'un des avantages de la SLS est qu'un grand nombre de matériaux peuvent être utilisés. Ceci permet d'élargir le champ d'application de cette impression (Gross et al 2014).

-La technique de frittage sélectif par laser produit des pièces solides sans besoin de traitement postérieur ou d'une étape de durcissement après l'impression comme avec la stéréolithographie (Guo, Leu 2013).

### 3.2.4. Les inconvénients

-Les modèles imprimés par SLS subissent un rétrécissement ou une déformation thermique sous l'influence du chauffage par le laser.

-Cette technologie possède une finition médiocre. Cela est dû à la taille des particules de poudre qui reste relativement grande et empêche un rendu final optimal (Gross et al 2014).

## 3.3. Modélisation par dépôt de fil en fusion (FDM)

### 3.3.1. Définition et principe

Ce procédé a été créé par la société américaine Stratasys Inc et est maintenant largement répandu grâce à son faible coût et sa facilité d'utilisation (Guo, Leu 2013). Cette technologie est basée sur le principe d'extrusion, ce qui consiste à pousser un matériel fondu issu d'un filament généralement en plastique à travers la tête d'impression, cette dernière ajoute le matériel couche par couche sur un plateau afin d'obtenir un objet (Figure 6) (Wendel et al. 2008).

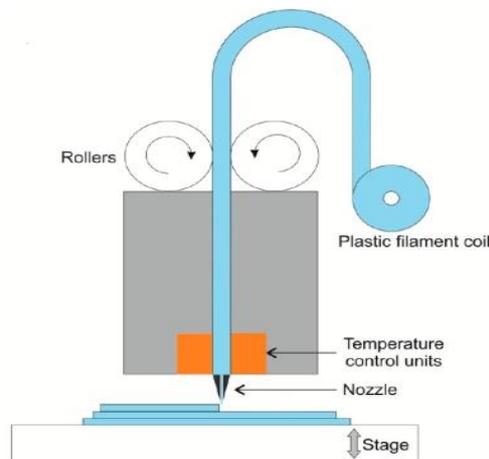


Figure 6 : Schéma de fonctionnement de Modélisation par dépôt de fil en fusion (Gross et al 2014).

### 3.3.2. Les différents matériaux utilisables

Dans cette technologie plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés. Une variété de matériau utilisable correspond au matériel plastique comprenant l'ABS (acrylonitrile butadiène

styrène), le PC (polycarbonate), le polyphénylène sulfone (PPSU) et des mélanges ABS/PC (Wendel et al. 2008). La céramique peut aussi être utilisée grâce à l'ajout de particules de céramique au sein d'un polymère plastique, le tout formant un filament mixte (Guo, Leu 2013). D'autres matériaux sont utilisables tels que la cire, le nylon ou encore des métaux grâce à l'incorporation de particules d'acier dans un filament de polyamide. Des polymères biocompatibles et biodégradables peuvent être aussi choisis comme le poly caprolactame ou des associations d'hydroxyapatite et de phosphate tri calcique (Wendel et al. 2008).

### **3.3.3. Avantages**

- Les modèles peuvent avoir une résistance élevée à la traction et rester imperméables, similaire à celle du jouet pour enfants «briques à assembler» ou «Legos».
- Les modèles sont également résistants aux chocs et actuellement sont plus économiques que les modèles obtenus par les systèmes à base de résine.

### **3.3.4. Les inconvénients**

- Emission des vapeurs malodorantes lors de la fusion de matériaux. Les locaux de production doivent donc être ventilés.
- Les matériaux sont également sensibles aux températures instables qui peuvent provoquer un affaissement du modèle souhaité (Temir et al 2015).

## **3.4. L'impression 3 dimension (3DP)**

### **3.4.1. Définition et principe**

En 1994, la première machine 3DP a été brevetée par un groupe de recherche du Massachusetts et est devenue disponible dans le commerce en 1997(Wendel et al. 2008). L'impression tridimensionnelle (3DP) est un processus de la fabrication additive (Additive manufacturing ou AM) dans lequel un rouleau permet l'étalement d'une couche de poudre à partir de la cuve de stockage sur la zone d'impression après la tête d'impression dépose un liant liquide qui va réagir avec la poudre pour lier leurs particules et la solidifier à fin de former une couche (Figure 7).

Une fois que la couche est entièrement solidifiée ces étapes se répètent autant de fois qu'il y a de couches à imprimer afin d'obtenir la pièce finale (Guo, Leu 2013).

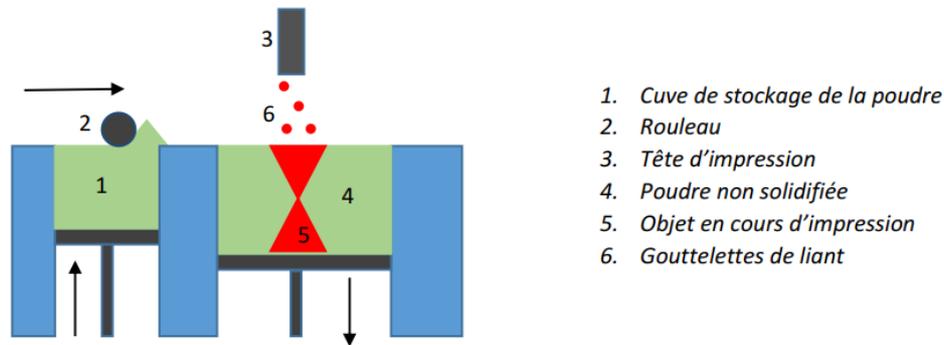


Figure 7 : Schéma représente une imprimante 3D (Guo, Leu 2013)

### 3.4.2 Les différents matériaux utilisables

Au niveau des matériaux utilisables par La 3DP, le choix est très large mais les plus communément utilisés sont le plastique, la céramique et les métaux. Théoriquement tout matériel sous forme de poudre peut être utilisé (Guo, Leu 2013).

### 3.4.3. Les avantage

-Elle permet la fabrication de pièces avec une bonne finition, une grande résistance et avec plusieurs couleurs (Wendel et al. 2008).

-Le large éventail de matériaux utilisables constitue un avantage non négligeable. En effet, ceci permet d'utiliser cette imprimante dans de nombreux domaines, que ce soit dans le design, l'industrie, le loisir ou même la science et la médecine.

### 3.4.4. Les inconvénients

-Cette technologie présente aussi des faiblesses. Notamment la taille des pièces imprimables peut représenter un frein à l'utilisation de cette imprimante.

-La porosité des pièces produites oblige à recourir à des traitements après l'impression. Par exemple, il est nécessaire d'infiltrer ou de chauffer la pièce afin d'obtenir un objet dense et

résistant. Ces traitements ne sont pas très compliqués mais représentent une perte de temps non négligeable et sont à prendre en compte dans la durée de production d'une pièce (Vaezi et al. 2013).

## **II. MODELES ANATOMIQUES IMPRIMES EN 3D POUR L'APPRENTISSAGE DE L'ANATOMIE**

L'anatomie est une discipline descriptive fortement axée sur les applications pratiques. Grâce à la formation anatomique, les étudiants peuvent mieux comprendre la physiologie, la pathologie et la résolution de problèmes cliniques chez les animaux. Traditionnellement, les animaux vivants et les spécimens ont joué un rôle important dans l'enseignement et l'apprentissage des structures animales mais la plupart des spécimens d'animaux doivent être conservés par une solution de formaldéhyde, ce qui peut être nocif et gênant pour les techniciens, les étudiants et les éducateurs. Tandis que la palatination (technique visant à préserver des tissus biologiques en remplaçant les différents liquides organiques par la silicone) des échantillons biologiques, quant à elle, est toutefois propre, sèche, sans odeur et durable, de sorte que les échantillons peuvent être manipulés sans gants et ne nécessitent aucune condition de stockage particulière mais reste un processus long, complexe et coûteux.

En médecine vétérinaire, La dissection a souvent été interprétée comme la référence en matière d'anatomie de l'enseignement. En raison de diverses contraintes pédagogiques, éthiques et économiques, l'utilisation de spécimens d'animaux dans l'enseignement de l'anatomie vétérinaire a diminué au cours des dernières décennies, tandis que de nouvelles ressources et méthodes d'enseignement nécessitant une utilisation moins consommatrice d'animaux ont augmenté (Fangzheng et al 2017 ; Daniela et al 2019).

Dans les cas où les dissections cadavériques sont limitées, les étudiants dépendent souvent beaucoup d'explication écrites et orales, ainsi que de représentations visuelles en 2 D. Cet enseignement a été fortement associé à une augmentation préjudiciable de la charge cognitive, entraînant une diminution de l'acquisition et de la rétention des connaissances (Fangzheng et al 2017 ; Daniel et al 2013 ; Daniela et al 2019). Certaines études (Fangzheng et al 2017) ont montré que les étudiants pensaient que le modèle imprimé en 3D les avait aidés à mieux comprendre et qu'il améliorait leur intérêt pour l'apprentissage.

Les processus technologiques modernes semblent offrir certaines solutions pour l'acquisition de ressources anatomiques. Un développement récent qui a été introduit dans un large éventail de domaines biomédicaux, y compris l'éducation, la pratique et la recherche est l'impression 3D, qui permet de fabriquer rapidement et avec précision des objets basés sur un modèle généré par ordinateur. Des répliques très précises imprimées en 3D ont été produites à des fins

pédagogiques dans le domaine de l'anatomie et les modèles numériques peuvent être analysés et modifiés avant la production. Après avoir numérisé des échantillons biologiques, les modèles réduits peuvent être imprimés en 3D soit en poudre de type plâtre, soit en filament en acide polylactique (PLA) ou bien en matière thermoplastique filamenteuse (acrylonitrile-butadiène-styrène, ABS) (Fangzheng et al 2017 ; Daniela et al 2019). Ces modèles imprimés offrent un avantage supplémentaire : il devient possible de créer des modèles vraiment plus grands que nature, en agrandissant les os pour rendre les détails plus faciles à voir et améliorer l'apprentissage des élèves. Un os sphénoïdal imprimé au États-Unis au niveau de l'Université Purdue a attiré l'attention des éducateurs afin de remplacer les kits en os (squelettes démontables en plusieurs os) utilisés par les étudiants dans leurs cours d'anatomie générale, car les kits d'os classiques coûtent cher à l'achat et à la création et sont également faciles à endommager en cours d'utilisation (Epps et al 2015).

Des modèles de squelettes imprimés en 3D ont été utilisés au cours de formations en laboratoire pour l'apprentissage de l'anatomie. Des échantillons de squelettes de bovins adultes : Le fémur (Figure 8), la cinquième côte et la sixième vertèbre cervicale (C6) provenant des collections du Collège de science animale et de médecine vétérinaire de l'Université agricole de Qingdao (Fangzheng et al 2017) et d'autres d'un cheval : la scapula, humérus, radius et ulna, carpe et phalanges (Daniela et al 2019) ont été sélectionnés pour la numérisation afin de créer les modèles 3D. Les échantillons squelettiques ont été numérisés à l'aide du scanner de surface 3D. Les modèles numériques ont été traités en fichiers STL, puis transférés dans l'imprimante 3D. Les dimensions du spécimen et les modèles imprimés en 3D ont été mesurés et comparés, il n'existait aucune différence significative entre eux (Fangzheng et al 2017 ; Daniela et al 2019).

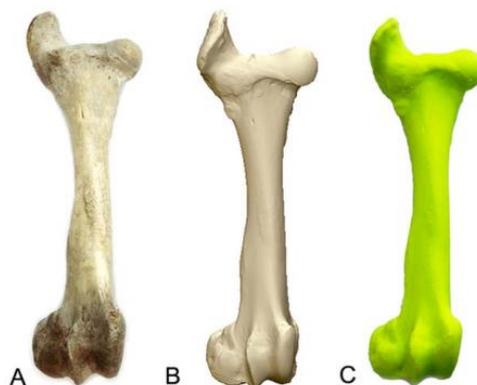


Figure 8 : vue dorsale du fémur de la vache adulte. A : spécimen d'os, B : modèle numérique, C : modèle imprimé en 3D (Fangzheng et al 2017).

Les caractéristiques anatomiques des échantillons d'os, les modèles numériques et les modèles imprimés en 3D ont également été analysés conformément au manuel d'anatomie vétérinaire des mammifères domestiques (Konig and Liebich, 2014). Une enquête a été distribuée pour évaluer les opinions des étudiants concernant l'utilisation de modèles imprimés en 3D dans l'enseignement de l'anatomie.

Les résultats du sondage ont montré que les étudiants considéraient que le modèle imprimé en 3D les avait aidés à mieux comprendre le matériel, et que les caractéristiques anatomiques des modèles imprimés en 3D n'étaient pas différentes de celles des modèles réels (Spécimens d'os). En ce qui concerne la sécurité et la commodité, les étudiants ont constaté que le modèle imprimé en 3D ne dégageait aucune odeur, qu'il était durable et qu'il améliorait leur intérêt pour l'apprentissage (Fangzheng et al 2017).

Les résultats montrent que les modèles imprimés en 3D peuvent constituer une alternative fiable aux échantillons osseux dans l'enseignement de l'anatomie vétérinaire (Fangzheng et al 2017 ; Daniela et al 2019).

Un autre exemple illustre cet intérêt. En effet, Le pied équin revêt une importance clinique énorme, La dissection d'une telle région en sciences vétérinaires est extrêmement difficile et dépasse largement les capacités des étudiants en raison des relations spatiales complexes de ses structures et de la présence d'une capsule à corne rigide.

Des études récentes en éducation vétérinaire ont démontré la valeur des modèles 3D du pied équin pour améliorer l'expérience d'apprentissage des étudiants (Daniel et al 2013 ; ADRIEN et al 2014 ; Daniela et al 2019). Ces études ont comparé l'efficacité des manuels, des modèles informatisés et des modèles imprimés en 3D dans l'enseignement de l'identification des structures anatomiques dans les images IRM du pied équin. Des reconstructions numériques ont été créées à partir d'images IRM puis prototypées afin de produire un modèle physique avec différentes structures anatomiques (os, des cartilages de sabots, des tendons, des ligaments, un coussinet digital et une capsule de sabot) (Daniel et al 2013) avec différentes couleurs (ADRIEN et al 2014), permettant à l'utilisateur de reconstruire le modèle à plusieurs reprises, créant ainsi un «puzzle» en 3D (Figure 9).

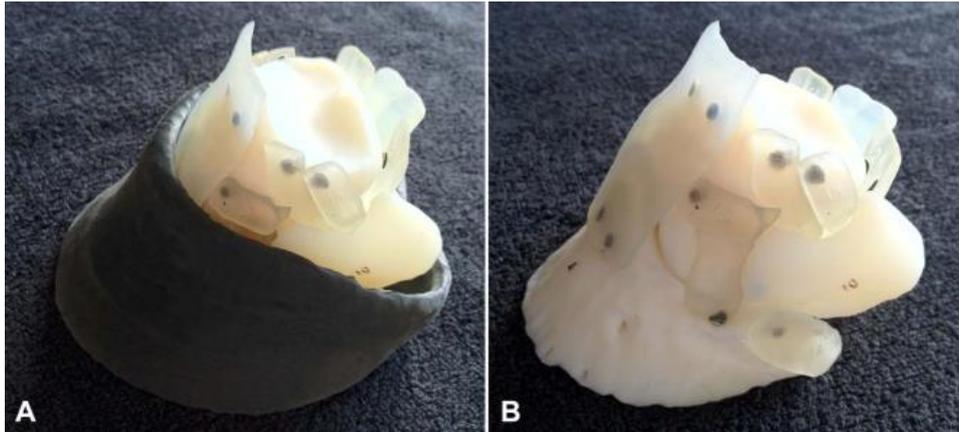


Figure 9 : Le modèle du pied équin imprimé en 3D. A entièrement assemblé et B avec la capsule de sabot enlevée. (WONG et al 2014)

Les élèves utilisant des modèles 3D ont obtenu de meilleurs résultats et ont eu une meilleure expérience d'apprentissage que ceux utilisant des modèles numériques ou des manuels (Daniel et al 2013 ; ADRIEN et al 2014), et ainsi démontré les avantages importants associés à l'utilisation d'un modèle physique pour améliorer l'appréciation Visio-spatiale des étudiants et leur compréhension de l'architecture anatomique complexe du pied équin(Daniel et al 2013 ; ADRIEN et al 2014 ; Daniela et al 2019)

Il convient cependant de noter que plusieurs limitations ont été notées. Les modèles créés à partir du scanner 3D (scanner de surface), qui sont les plus accessibles actuellement décrivent uniquement les structures de surface. La précision du scanner utilisé est 0,05 mm, alors que les données cliniques de tomodensitométrie et d'IRM peuvent résoudre les structures à l'échelle submillimétrique. Ainsi, les détails des modèles numériques créés par la technologie de numérisation 3D sont inférieurs à celles des modèles similaires créés à partir de données de tomodensitométrie ou d'IRM (Fangzheng et al 2017).

## **DEUXIEME PARTIE : Partie Expérimentale**

L'anatomie est une discipline descriptive fortement axée sur les applications pratiques. En médecine vétérinaire, la dissection a souvent été interprétée comme la référence en matière d'anatomie dans l'enseignement. En raison de diverses contraintes pédagogiques, éthiques et économiques, l'utilisation de spécimens d'animaux dans l'enseignement de l'anatomie vétérinaire a diminué au cours des dernières décennies.

Les processus technologiques modernes semblent offrir certaines solutions pour l'acquisition de ressources anatomiques. Un développement récent qui a été introduit dans un large éventail y compris l'éducation, la pratique et la recherche est l'impression 3D, qui permet de fabriquer rapidement et avec précision des modèles anatomiques basés sur un modèle généré par ordinateur. Des répliques très précises imprimées en 3D ont été produites à des fins pédagogiques dans le domaine de l'anatomie et les modèles numériques peuvent être analysés et modifiés avant la production.

### **I. Objectif**

Le but de cette recherche était de développer et de caractériser une méthode de production rapide de modèles d'os à haute-fidélité, puis de vérifier cette fidélité et donc d'explorer de nouvelles alternatives à l'utilisation consommatrice de spécimens d'animaux vivants dans l'enseignement vétérinaire.

Dans cette partie, nous avons tenté de mener une expérience sur l'impression en 3 dimensions en comparant la géométrie de pièces anatomiques réelles et imprimées. Au-delà, d'une simple comparaison, il s'agit plus d'apprendre à utiliser l'impression en 3 dimensions et de pouvoir tester une des applications de cette technologie, l'impression de modèles anatomiques à visée pédagogique.

## **II. MATERIELS ET METHODE**

### **1. Choix de l'échantillon**

Afin de constituer l'échantillon qui servira à la comparaison nous avons pensé pour la première intention à un fémur d'un chat ou d'un chien mais ce qui nous a obligés à réorienter notre choix, c'est la difficulté extrême de trouver des os de ces espèces pour des raisons éthique.

Nous avons donc choisi un fémur de mouton. Le choix de cette espèce a pour but de minimiser les couts de l'impression 3D en raison de leur petite taille (objet de petite taille donc moins

couteux) par rapport aux autres espèces comme les bovins et les équidés. Notre échantillon (Figure 10) a été obtenu par l'intermédiaire d'un boucher.



Figure 10 : fémur droite du mouton (Photo personnelle. 2020. ENSV).

## 2. Nettoyage et blanchissement de l'os

Les grandes portions musculaires sont d'abord sectionnées aux ciseaux et couteau et éliminées. A l'aide d'une lame de bistouri montée sur un manche, le maximum de chairs restantes sont soigneusement retirées en évitant de rayer l'os. (Figure: 11)

Dans une deuxième étape, pour débarrasser l'os des traces de tissus mous (restes des portions macroscopiquement visibles de muscles, tendons et de ligaments), nous avons placé l'os dans un récipient en acier inoxydable (grande casserole) rempli d'eau. L'eau est montée et maintenue à ébullition à l'aide de deux becs benzène pendant une période de 60 à 90 minutes (Figure 12).

Après avoir retiré et égoutté l'os, et attendu le refroidissement, nous passons à la troisième étape qui consiste à la répétition de la première étape (Figure 13). Le nettoyage final est réalisé de façon encore plus minutieuse, en veillant à ne pas endommager l'os.

Pour le blanchissement de l'os, le fémur entier est remis dans un récipient rempli d'eau. Lorsque la température de l'eau a atteint 60°C, nous avons ajouté le composant le plus important de cette étape : perborate de sodium  $\text{NaBO}_3$  jusqu'à l'obtention d'un mélange plus ou moins visqueux.

De par ses propriétés, ce produit est utilisé pour le nettoyage, la dissolution des graisses et le blanchissement des os (Figure 14). L'os est maintenu immergé dans le mélange pendant 30

minutes à 3 heures. Enfin la surface de l'os est frottée avec une éponge et rincée soigneusement. La figure 15 montre le résultat final du protocole.



Figure 11 : fémur après manipulation par la lame de bistouri (Photo personnelle. 2020. ENSV).



Figure 12 : la deuxième étape (Photo personnelle. 2020. ENSV).



Figure 13 : résultat de la troisième étape (Photo personnelle. 2020. ENSV).



Figure 14 : début de l'étape de blanchissement (Photo personnelle. 2020. ENSV).



Figure 15 : fémur après blanchissement (Photo personnelle. 2020. ENSV).

### 3. L'impression de l'os synthétique

Dans notre étude l'acquisition d'image s'est fait par un scanner de surface intégré à l'imprimante. Le scan aboutit directement à une représentation 3D de l'objet scanné grâce à un logiciel. Dans ce cas l'imagerie médicale, elle n'est pas nécessaire parce que seule la surface de l'os qui nous intéresse, l'étape de traitement des images peut également être négligé, les trois étapes de base sont : l'acquisition de l'image ou la numérisation, l'impression et le post-traitement.

#### 3.1. L'acquisition de l'image ou la numérisation

L'os a été scanné ou numérisé grâce à un scanner de surface 3D (3D ROMER ARM) au niveau de centre de recherche et de développement des technologies avancées d'Alger (CDTA). La numérisation a été effectuée dans une pièce obscure. Le scanner a été calibré avant l'acquisition pour déterminer la taille absolue des objets numérisés. La précision du scanner a été calibrée à 0.069 mm, la durée totale de la numérisation n'a duré que 2 heures. Les données ont été assemblées en un nuage de points pour nous donner une représentation 3D de fémur scanné sur un logiciel (GEOMAGIC) (Figure 16) en format STL standard pour toutes les imprimantes 3D. Une fois le modèle est prêt à être envoyer au logiciel de l'imprimante et à être imprimé en 3 dimension. Le logiciel donne une estimation du temps d'impression et lancer l'impression en 3 dimensions.

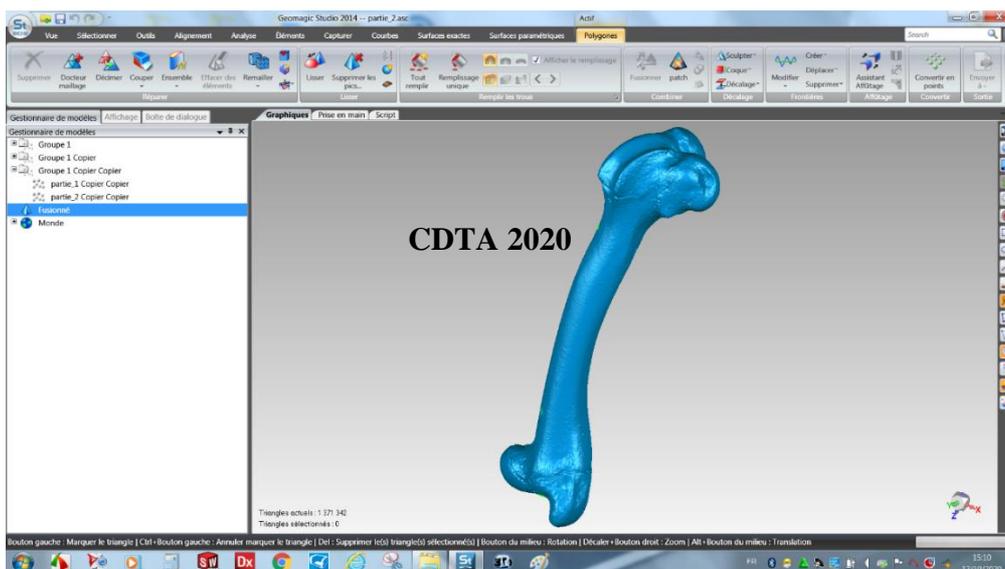


Figure 16 : 'écran d'accueil du logiciel GEOMAGIC après la numérisation (Photo personnelle. 2020. CDTA).

### 3.2. L'impression

L'imprimante en 3 dimensions choisie utilise la technologie de frittage sélectif par laser (SLS Spro60 HD 3DSystem) (Figure 17), vu le nombre de détails inclus dans la pièce à fabriquer. La matière utilisée le polyamide PA12 (polymère thermoplastique composée à base de nylon) Ce dernier aboutit à une polymérisation puis une solidification de la poudre aux endroits sélectionnés par un laser infra rouge de forte puissance dirigé par ordinateur vers l'endroit désiré pour le frittage ; sur la poudre placée au niveau de la cuve de l'imprimante sur un plateau mobile selon l'axe vertical, permettant l'impression d'objets résistant, détaillés, de densité élevée et avec une grande , permettant leur utilisation fonctionnelle dès la fin de l'impression.

La poudre étant composée de fines particules solides, cet environnement joue le rôle de support pour la pièce en construction. Aucun support n'est donc nécessaire pendant l'impression pour soutenir l'objet au moment de la fabrication.



Figure 17: l'imprimante 3D SLS Spro60 HD 3DSystem (Photo personnelle. 2020. CDTA).

### 3.3. Post-traitement

Après impression et avant manipulation, la pièce imprimée a été laissée à température ambiante pendant 6 heures pour lui permettre de refroidir, on a procédé à un sablage de l'os (Figure 18) afin d'obtenir des surfaces plus définies avec un aspect plus lisse. Pour des raisons sécuritaires,

une cabine de sablage spécialement conçue pour le post-traitement de pièces imprimées en 3D grâce à la technologie SLS est nécessaire.

Nous avons introduit l'os dans la cabine de sablage, ce dernier a été exposé au sable projeté à grande vitesse à travers un pistolet.



Figure 18 : l'étape de post-traitement (Photo personnelle. 2020. CDTA).

#### **4. Etude comparative**

Dans cette étude la précision et la fiabilité du modèle numérique et du modèle imprimé ont été confirmées par une analyse des caractéristiques anatomiques et des mesures dimensionnelles.

Les caractéristiques anatomiques du fémur, du modèle numérique et du modèle imprimé en 3D ont également été analysés conformément au manuel d'anatomie vétérinaire des mammifères domestiques (veterinary anatomy of domestic mammals) (Konig and Liebich, 2014). La présence et l'absence des points anatomiques du fémur ont été recherchées (tête fémorale, la fosse trochantérienne grand trochanter, petit trochanter, trochlée, condyle latéral et médial, l'insertion de ligament rond ainsi que le foramen nourricier)

Les dimensions du spécimen de fémur et du modèle imprimé en 3D ont été mesurés par un seul observateur à l'aide d'un (mètre ruban), et le modèle numérique a été mesuré à l'aide du logiciel (Geomagic). Chaque mesure a été répétée trois fois (Figure 19).

5 mesures ont été retenues : Longueur maximale, largeur maximale de l'épiphyse proximale, largeur maximale de l'épiphyse distale, largeur maximale de la tête fémorale, circonférence maximale de la diaphyse

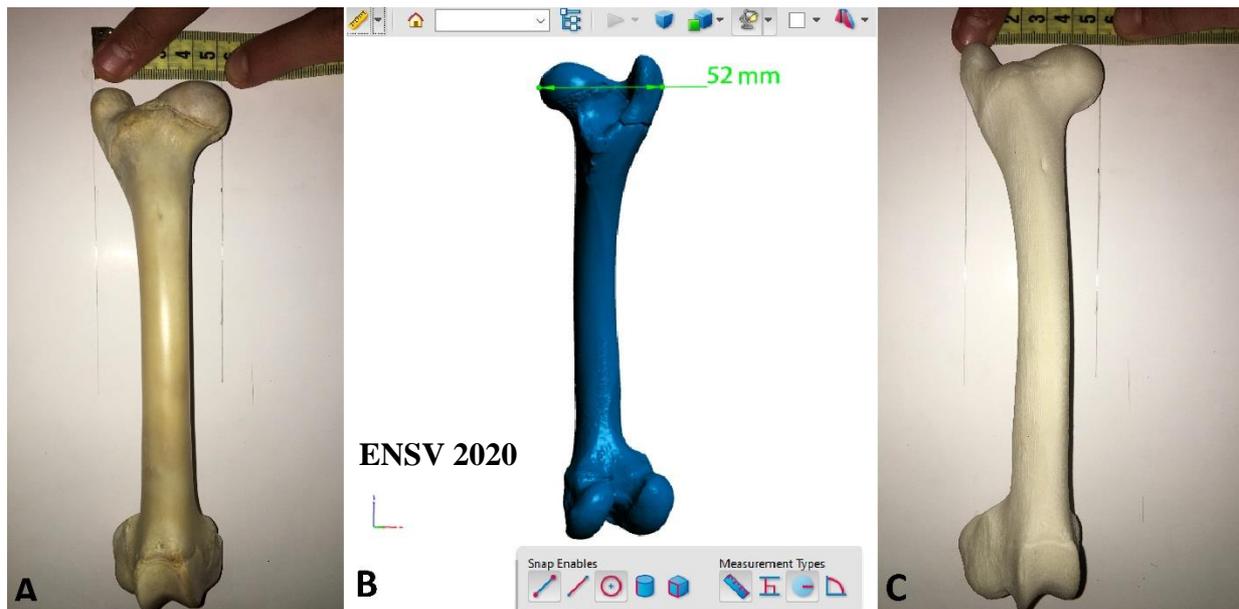


Figure 19 : prise de mesure de la largeur de l'épiphyse proximale de fémur. A : os biologique. B : modèle numérique. C : os imprimé en 3D (Photo personnelle. 2020. ENSV).

### III. RESULTATS

En appliquant les étapes de préparation et d'impression sur l'os choisi, nous avons obtenu une copie de l'objet d'étude sélectionné pour notre expérience de comparaison. Le modèle fémoral a nécessité 6 heures d'impression et a consommé 101 g de PA12 (Figure 20).



Figure 20 : Fémur imprimé en 3D. A : vue crânial. B : vue caudal (Photo personnelle. 2020. ENSV).

Concernant l'étude comparative, presque toutes les caractéristiques anatomiques originales des spécimens biologiques du fémur étaient bien résolues à l'exception de la profondeur du foramen nourricier.

Les dimensions mesurées du modèle imprimé en 3D et du modèle numérique ont été comparées à celles du spécimen biologique d'origine, ne démontrant aucune différence significative entre le modèle d'origine et les modèles répliqués (modèle numérique et l'os imprimé en 3D). Cela suggère que les modèles 3D pourraient afficher avec précision presque toutes les caractéristiques anatomiques des spécimens d'origine. Les résultats des mesures comparatives sont répertoriés dans le tableau 1.

Tableau 1: tableau comparatif du fémur ovin.

<b>Fémur ovin</b>	<b>Os biologique</b>	<b>Modèle numérique</b>	<b>Os imprimé en 3D</b>	<b>Erreur</b>
<b>Longueur maximale</b>	204 mm	204 mm	204 mm	0 mm
<b>Largeur maximale de l'épiphyse proximale</b>	52 mm	52 mm	51 mm	1 mm
<b>Largeur maximale de l'épiphyse distale</b>	46 mm	46 mm	46 mm	0 mm
<b>Largeur maximale de la tête fémorale</b>	22 mm	22 mm	21 mm	1 mm
<b>Circonférence maximale de la diaphyse</b>	58 mm	58 mm	57.5 mm	0.5 mm

## DISCUSSION

Au vu des résultats et à la faible différence (maximum 1 mm) entre les mesures effectuées sur le spécimen biologique et celui imprimé, nous pouvons considérer que l'impression en 3 dimensions et notamment le frittage sélectif par laser peut représenter un moyen fiable, rapide, économique et efficace pour reproduire des pièces anatomiques. Dans un but pédagogique, cela représente un atout non négligeable dans l'enseignement des étudiants en anatomie. Les enseignants d'anatomie animale en Algérie pourraient disposer de tels modèles en grand nombre, voire créer eux même, à la demande des modèles utiles assez rapidement et facilement après une formation opérationnelle minimale sur l'utilisation du scanner de surface 3D et de l'imprimante 3D.

De plus, au vu des caractéristiques de l'imprimante 3D utilisée et notamment sa précision, nous pouvons penser que les erreurs trouvées seraient plus dues à un biais dans la prise de mesure qu'à une véritable imprécision de l'impression. En effet, à l'œil nu et avec un mètre ruban, il s'avère très difficile d'avoir une précision supérieure au millimètre et surtout une erreur de 1 mm est difficilement évitable avec le matériel utilisé. Pour augmenter la précision des mesures, nous aurions pu utiliser un matériel plus précis comme un laser par exemple. Cependant, pour notre étude, ces mesures nous semblent suffisantes pour pouvoir affirmer que l'impression 3D est un moyen fiable de copier des os dans un but pédagogique. Ces résultats sont cohérents avec ceux précédemment rapportés par d'autres auteurs (Daniela et al 2019 ; Fangzheng et al 2017).

Comme décrit dans une étude précédente (Epps et al 2015 ; Daniel et al 2013), l'impression 3D est nettement moins chère que l'achat ou la production de spécimens plastifiés. Les coûts de production des modèles étaient relativement peu coûteux après un investissement approprié dans le matériel de numérisation et d'impression. Le modèle imprimé du fémur ovin coûte environ 2000 DA. Il a fallu moins de 24 heures pour imprimer le modèle. En revanche, obtenir des échantillons osseux biologiques à des fins d'anatomie est un processus beaucoup plus complexe. Dans la présente étude, il a fallu beaucoup plus de temps pour obtenir les os pour servir d'échantillons biologiques originaux que pour produire les modèles 3D.

La technique de frittage sélectif par laser produit des pièces solides sans besoin d'une étape de durcissement après l'impression. Cette technologie possède cependant une finition médiocre due à la taille des particules de poudre qui restent relativement grande et empêche un rendu final optimal. Bien que peu de traitements post-impressions soient nécessaires, l'obtention d'un rendu plus lisse peut nécessiter une étape de sablage ce qui a été le cas dans notre étude. Ceci

pourrait expliquer la perte de profondeur observée sur le foramen nourricier. Cet élément anatomique est cependant présent contrairement à ce qui est observé sur des os obtenus par d'autres techniques d'impression (Fangzheng et al 2017). Ceci confirme l'intérêt de la technique choisie.

Le modèle imprimé en 3D dans cette étude peut donc selon nous être utilisé comme auxiliaires pédagogiques lors des séances de laboratoire des étudiants, le modèle imprimé en 3D peut clairement améliorer la compréhension de l'anatomie squelettique de base et semble constituer une ressource pédagogique alternative fiable aux échantillons osseux dans l'enseignement de l'anatomie vétérinaire. Ces modèles imprimés offrent un avantage supplémentaire : il devient possible de créer des modèles vraiment plus grands que nature, en agrandissant les os pour rendre les détails plus faciles à voir et améliorer l'apprentissage des élèves (Epps et al 2015).

Enfin, dans cette étude, seul un os sain a été utilisé mais nous pouvons aisément imaginer l'application de la même méthode à des os pathologiques ou même à des articulations. Les étudiants pourraient alors plus facilement appréhender certains processus pathologiques comme l'arthrose par exemple et les remaniements osseux qui en résultent.

## **CONCLUSION**

Cette étude présente une méthode pour fabriquer rapidement des modèles d'os imprimés en 3D très précis de manière simple et économique en utilisant les technologies de numérisation 3D et d'impression 3D. La précision et la fiabilité des modèles imprimés ont été confirmées par une analyse visuelle des caractéristiques anatomiques et une étude comparative des mesures.

Ainsi, grâce à des études futures impliquant des tests de modèles imprimés en 3D avec des étudiants en cours d'anatomie vétérinaire, ces modèles pourraient bientôt être considérés comme une aide dans les leçons d'anatomie et peuvent servir d'alternatives fiables aux pièces anatomiques classiques dans l'étude de l'anatomie vétérinaire.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**ADRIEN-MAXENCE HESPEL, RAY WILHITE, JUDITH HUDSON. (2014).** invited review-applications for 3d printers in veterinary medicine. American College of Veterinary Radiology.

**AMY VAN EPPS, DAVIN HUSTON, JOHN SHERRILL, ANN ALVAR, ANNA BOWEN. (2015).** How 3D Printers Support Teaching in Engineering, Technology and Beyond. Bulletin of the Association for Information Science and Technology – Volume 42, Number 1.

**ARCAUTE, KARINA, MANN, BRENDA ET WICKER, RYAN, (2010).** Stereolithography of spatially controlled multi-material bioactive poly (ethylene glycol) scaffolds. Acta Biomaterialia. . Vol. 6, n° 3, pp. 1047-1054.

**CHEN H, GABRIEL M. (2016).** A Roadmap from Idea to Implementation: 3d Printing for Presurgical Application; Operational Management for 3d Printing in Surgery: CreateSpace Independent Publishing Platform.

**DANIEL PREECE, SARAH B. WILLIAMS, RICHARD LAM, RENATE WELLER. . (2013).** “Let’s Get Physical”: Advantages of a Physical Model over 3D Computer Models and Textbooks in Learning ImagingAnatomy. American Association of Anatomists.

**DANIELA DE ALCÂNTARALEITE DOS REIS, BEATRIZ LAURA ROJAS GOUVEIA, JOSÉ CARLOS ROSA JÚNIOR AND ANTÔNIOCHAVES DE ASSIS NETO. (2019).** Comparative assessment of anatomical details of thoracic limb bones of a horse to that of models produced via scanning and 3D printing. 3D Printing in Medicine.

**EERO HUOTILAINEN, RISTOJA ANIMETS, JIRÍVALÁSEK, PETR MARCIÁN, MIKA SALMI, JUKKATUOMI, ANTTI MÄKITIE, JAN WOLFF. (2013).** Inaccuracies in additive manufactured medical skull models caused by the DICOM to STL conversion process.

**FANGZHENG LI, CHUNYING LIU, XUOXIONG SONG, YANJUNHUAN, SHANSONG GAO, ZHONGLING JIANG. (2017).** Production of Accurate Skeletal Models of Domestic Animals Using Three-Dimensional Scanning and Printing Technology. American Association of Anatomists.

**GILLASPIE EA, MATSUMOTO JS, MORRIS NE, DOWNEY RJ, SHEN KR, ALLEN MS. (2016).** From 3-Dimensional Printing to 5-Dimensional Printing: Enhancing Thoracic Surgical Planning and Resection of Complex Tumors. *The Annals of thoracic surgery.* 101(5):1958-62.

**GROSS, BETHANY C., ERKAL, JAYDA L., LOCKWOOD, SARAH Y, CHEN, CHENGPENG ET SPENCE, DANA M. (2014).** Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. *Analytical chemistry.* Vol. 86, n° 7, pp. 3240-3253.

**GUO, NANNAN ET LEU, MING C. (2013).** Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering.* Vol. 8, n° 3, pp. 215-243.

**HUOTILAINEN E, PALOHEIMO M, SALMI M, PALOHEIMO K-S, BJORKSTRAND R, TUOMI J. (2014).** Imaging requirements for medical applications of additive manufacturing. *ActaRadiologica;* vol. 55(1):78-85.

**KAMRANI, ALI K. ET NASR, EMAD ABOUEL, (2010).** *Engineering Design and Rapid Prototyping.* Springer Science & Business Media.

**KONIG AND LIEBICH. (2014).** *veterinary anatomy of domestic mammals.* 3eme edition. Schattauer pp 226.

**MITSOURAS D, LIACOURAS P, IMANZADEH A, GIANNOPOULOS AA, CAI T, KUMAMARU KK. (2015).** Medical 3D Printing for the Radiologist. *Radiographics.* 35(7):1965-1988.

**TAMIR F & M MICHALSKI 1 & T. ROB GOODMAN & J. ELLIOTT BROWN. (2015).** 3D printing from diagnostic images: a radiologist's primer with an emphasis on musculoskeletal imaging—putting the 3D printing of pathology into the hands of every physician. *Skeletal Radiol.* 23 Nov.

**VAEZI, MOHAMMAD, CHIANRABUTRA, SRISIT, MELLOR, BRIAN ET YANG, SHOUFENG, (2013).** Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review: This review paper covers a decade of research on multiple material additive manufacturing technologies which can produce complex geometry parts with different materials. *Virtual and Physical Prototyping.* Vol. 8, n° 1, pp. 19-50.

**WENDEL, BETTINA, RIETZEL, DOMINIK, KÜHNLEIN, FLORIAN, FEULNER, ROBERT, HÜLDER, GERRIT ET SCHMACHTENBERG, ERNST, (2008).** Additive Processing of Polymers. Macromolecular Materials and Engineering. . Vol. 293, n° 10, pp. 799-809.

**WONG JY, PFAHNL AC. (2014).** 3D printing of surgical instruments for long duration space missions. AviatSpace Environ Med; 85:758 – 63.