



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de:

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication mécanique et productique

Présenté par :

BOUCHELALLEG Nassereddine

Thème

**Etude et réalisation par Retro conception
d'une pièce à intérêt médical**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
SLAMANI Mohamed	Prof	Président
AMROUNE Salah	Prof	Encadreur
AIMEUR Noureddine	Doc	Examineur

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/ /2020

Remerciements

*Louange à Dieu Créateur des univers, l'Omniscient, Qui
m'a donné la force, le courage et l'endurance jusqu'à
l'accomplissement de ce travail.*

*Au terme de ce travail, Nous souhaitons
remercier en premier lieu*

*Pf. AMROUNE Salah. Pour avoir dirigé ce travail, leur
encadrement, leurs précieux conseils ont été d'une aide
précieuse.*

Un grand merci pour :

*Les professeurs de la branche génie
mécanique.*

*Merci à tous ceux qui ont participé directement ou
indirectement aux résultats de ce travail.*

*Enfin, je souhaite remercier ma famille, Celui qui m'a
aidé et ce travail ne se serait pas passé sans eux.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ *A mes chers parents qui ont tout fait pour ma réussite.*
- ❖ *A ma chère femme qui m'a aidé et m'a encouragé.*
- ❖ *A mes chers enfants.*
- ❖ *A ma chère fille Safa.*
- ❖ *A mes chers fils Mohammad, Youssef, Idris et Ibrahim*
- ❖ *A mes chers frères et mes chères sœurs.*
- ❖ *A toutes mes tantes et mes oncles.*
- ❖ *A ma belle-famille.*
- ❖ *A tous mes amis.*

nassereddine

Tables des matières

Remerciements

Table des matières

Liste des figures

Notations

Introduction général

Chapitre I : Généralité sur la rétro conception	12 - 32
Introduction à la rétro-ingénierie	13
Introduction	13
I .3- Qu'est-ce que la rétro conception (l'ingénierie inverse)	14
I.4-Pourquoi utiliser la rétro-ingénierie	17
I.5- Le processus générique	18
I.6-Les étapes de la rétro-ingénierie.....	25
I.7-Avantages de l'utilisation de la rétro-ingénierie en fabrication additive	30
I.8-Exemples de cas où la rétro-conception peut être utilisée	30
Chapitre II : Les méthodes et Processus de la rétro conception	32 - 48
II.1-Introduction	33
II.2- Les techniques de mesures avec et sans contacts	33
II.3- Outil de reconstruction	43
II .4- Les difficultés	44
II.5-Processus de rétro conception.....	44
II.6- Modes d'acquisition	46
II .7- Quelques exemples	48
Chapitre III : Généralité sur scanner 3D	50 - 65
III-1 Introduction.....	51
III-2 Les types de 3D Numériseurs et 3D Balayage Les technologies	51

III -3 Scanner 3D vs MMT (machine à mesurer tridimensionnelle)	58
Chapitre IV : L'impression 3D dans le domaine médical	60 -78
IV .1- Définition	61
IV .2- L'impression 3D : une nouvelle technologie en santé	61
IV .3- Le principe de l'impression en trois dimensions (3D).....	61
IV .4- Les avantages de l'impression 3D dans le secteur médical	61
IV .5- Les applications médicales	63
IV .6- L'impression 3D est fréquemment utilisée dans ces domaines.....	90
IV .7- Modélisation de l'objet	64
IV .8- Principaux procédés de fabrication	65
IV .9- Applicationsdel'impression3D dans le domaine médical	77
IV .10- Conclusion	78
Chapitre V : Numérisation et Impression 3D des pièces à intérêt médical	79 -87
V .1- Numérisation et Impression 3D d'une orthèse du poignet sur mesure.....	80
V .2- Numérisation 3D d'une prothèse amovible à l'aide de FARO.....	84
V .3- Traitement des données	87
Conclusion	89
Références bibliographiques	90
Résumé	91

Liste de figure

Chapitre I :

Figure 1.1. Cycle de développement de produit

Figure 1.2. Processus physique-numérique

Figure 1.3. La rétro-conception le processus générique

Figure 1.4. Sonde tactile à balayage de contact.

Figure 1.5. Dispositif de balayage optique

Figure 1.6. Dispositif de balayage optique

Figure 1.7. Scanners3D

Figure 1.8. Scanners3D d'une prothèse dentaire

Figure 1.9. Post traitement

Figure 1.11. Conception 3D

Figure 1.12. Impression3D

Chapitre II :

Figure II .1. Moyens de mesures directes

Figure II .2. Moyens de mesures indirectes

Figure II .3. Machines à mesures tridimensionnelle

Figure II .4. Les pièces à éclairer absorbent, diffusent et/ou réfléchissent

Figure II .5. Mesures de position des points par triangulation

Figure II .6. Principe de Méthodes par triangulation

Figure II .7. Projecteur de Franges

Figure II .8. Chaque point est identifié par sa phase

Figure II .9. Exemples Méthodes par projection de franges

Figure II .10. vidéogrammétrie

Figure II .11. Exemple de systèmes par photogrammétrie /vidéogrammétrie

Figure II .12. Méthode par défocalisation

Figure II .13. Système tracker

Figure II .14. Exploitation de la rétro conception sur petit animal

Figure II .15. Exploitation de la rétro conception sur petit animal

Figure II .16. mode d'acquisition passive

Figure II .17. mode d'acquisition active

Figure II .18. mode d'acquisition active

Figure II .19. Mode d'acquisition destructif

Figure II .20. Quelques exemples

Figure II .21. Quelques exemples

Chapitre III :

Figure III -1 Konica-Minolta Gamme 7 3D laser scanner

Figure III -2 Créaform HandySCAN portable 3D laser scanner

Figure III -3 Steinbichler Comète Structuré lumière Bleu DIRIGÉ 3D Scanner

Figure III -4 Surphaseur Long Gamme 3D Scanner

Figure III-5 MMT Wenzel

Figure III -6 Bras basé Scanner 3D et système de sondage

Figure III -7 Créaform MetraSCAN optiquement suivi 3D balayage et sondage système

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Impression par Dépôt de Matière Fondue

Figure IV.2 : Impression 3D par stéréolithographie

Figure IV.3 : Impression 3D par procédé DLP

Figure IV.4 : Impression 3D par PolyJet

Figure IV.5 : Impression 3D par Frittage Sélectif par Laser

Figure IV.6 : Impression 3D par frittage laser direct de métal (DMLS)

Figure IV.7 : Appareillages dentaires issus de la technologie SLS

Figure IV.8 : Impression 3D par fusion de faisceau d'électrons ou Electron BeamMelting (EBM)

Figure IV.9 : Impression 3D par agglomération de poudre et collage

Chapitre V :

Figure V.1 : Digitalisation

Figure V .2 : importation des images acquises par SCAN

Figure V .3 : traitement des images par CAO

Figure V .4 : Orthèse après l'impression format bivalve d'ouverture facile

Figure V .5 : système de rééducation et système d'ultrasons

Figure V .6 : Orthèse de stabilisation post fracture EDR

Figure V 7 : produit liquide de type SHERWIN

Figure V 8 : Le plan de logiciel de scanner.

Figure V 9 : Scanne de la prothèse

Figure V 10 : le nuage de point

Figure V 11 : Corps Scanné mailé format STL avant préparation

Figure V 12 : Corps préparé

Figure V 13 : Création des courbes pour construire le corps surfacique

Figure V 14 : Comparaison (contrôle de déviation) entre le corps scanné et le modèle 3D finale

Figure V 15 : Export de fichier pour l'impression 3D

Notations :

CAO : Conception Assistée par Ordinateur.

DES : Digitized Shape Editor.

MMT : Machine à Mesurer Tridimensionnelle.

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur.

NURBS: Non-Uniform Rational Basis Spline.

RPD : développement rapide de produits.

STL : est un format de fichier natif du logiciel de CAO de stéréo lithographie créé par 3D System.

CCD : dispositifs à couplage de charge (Charge Coupled Device).

DXF : (Drawing Interchange Format, ou format d'échange de dessins).

DWF : (Design Web Format).

FARO Technologies Inc : est une entreprise industrielle spécialisée dans la fabrication de systèmes de mesure 3D portables. L'entreprise a été fondée en 1982 et est cotée au NASDAQ depuis 1989. FARO développe et distribue des machines à mesurer tridimensionnelles et des systèmes CAM (mesure de fabrication assistée par ordinateur).

Introduction général :

Au cours des dernières décennies, la modélisation géométrique s'est avérée être un outil essentiel dans de multiples domaines tels que la conception industrielle et le domaine médical, offrant ainsi de nombreuses applications pratiques. Grâce à l'utilisation de techniques de mesure tridimensionnelle, la rétro conception des pièces permet d'obtenir rapidement une représentation en points des surfaces en 3D. Les domaines d'application de la rétro conception sont extrêmement variés, allant de la mécanique à l'art en passant par l'architecture et la médecine. Ainsi, la rétro conception offre une vision globale des surfaces 3D dans un laps de temps relativement court, permettant son utilisation dans de nombreux domaines.

Dans le cadre de notre mémoire, nous avons entrepris une analyse et une étude sur la rétro conception d'une pièce d'intérêt médical. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons structuré notre travail en cinq chapitres distincts. Le premier chapitre est consacré à une étude théorique sur la rétro conception, mettant en lumière les différentes technologies associées. Nous y avons également présenté une vue d'ensemble des méthodes et processus de rétro conception dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre traite de l'historique des scanners 3D et de leur classification, permettant ainsi de mieux comprendre les principaux types de méthodes utilisées. Nous avons également examiné les domaines d'utilisation associés à ces scanners. Le quatrième chapitre aborde la numérisation et l'impression 3D, en détaillant les différents types de numérisation ainsi que les techniques d'impression 3D. Nous avons également exploré les applications de ces technologies dans le domaine médical. Le cinquième chapitre, qui constitue la numérisation et l'impression 3D des pièces d'intérêt médical de notre étude, porte sur la numérisation de pièces d'intérêt médical à l'aide d'un scanner 3D FARO. Nous avons choisi de nous concentrer sur une prothèse dentaire, et avons procédé à leur numérisation. Enfin, nous avons terminé notre étude par une conclusion générale, récapitulant les principales découvertes et soulignant l'importance de la rétro conception dans le domaine médical.

Chapitre I
Généralité sur la rétro conception

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

I-1 Introduction à la rétro-ingénierie

Ce chapitre présente aux lecteurs le terme rétro-conception et les techniques associées qui peuvent être utilisées pour numériser des pièces physiques. En outre, le chapitre présente le processus de rétro-conception et la stratégie de numérisation et de conversion des données numérisées en une surface 3D ou un modèle solide. [01]

I-2 Introduction

Dans le marché mondial extrêmement concurrentiel d'aujourd'hui, les entreprises de produits recherchent en permanence de nouveaux moyens de raccourcir les délais de développement de nouveaux produits qui répondent à toutes les attentes des clients.

En général, l'entreprise de produits a investi dans CAD/CAM le prototypage rapide et une gamme de nouvelles technologies qui offrent des avantages commerciaux. La rétro-conception est désormais considérée comme l'une des technologies qui offrent des avantages commerciaux en raccourcissant le cycle de développement de produits. La figure 1.1 ci-dessous montre comment la rétro-conception permet de boucler la boucle entre ce qui est « tel que conçu » et ce qui est « réellement fabriqué ». [01]

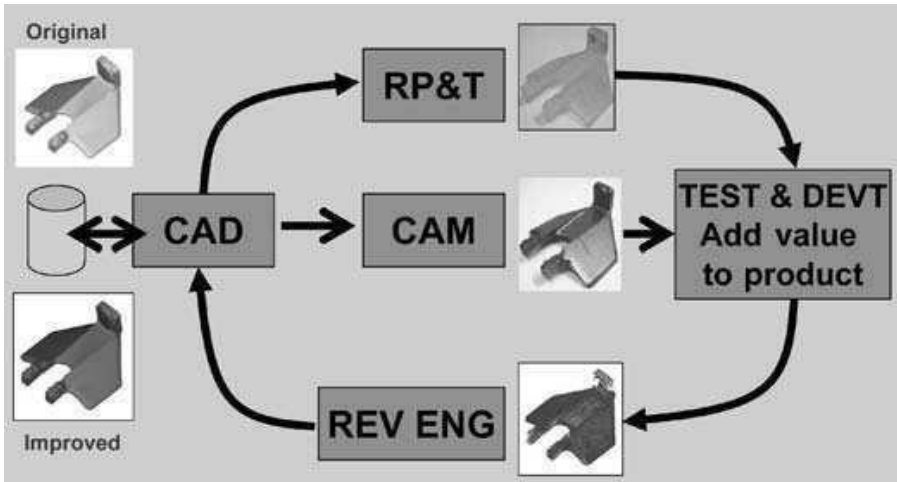


Figure 1.1. Cycle de développement de produit

I.3- Qu'est-ce que la rétro conception (l'ingénierie inverse) :

L'ingénierie est le processus de conception, de fabrication, d'assemblage et de maintenance produits et systèmes de conservation. Il existe deux types d'ingénierie, l'ingénierie avancée et l'ingénierie inverse. L'ingénierie avancée est le processus traditionnel qui consiste à passer d'abstractions de haut niveau et de conceptions logiques à la mise en œuvre physique d'un système. Dans certaines situations, il peut y avoir une pièce/un produit physique sans aucun détail technique, comme des dessins, des nomenclatures ou sans données d'ingénierie. Le processus de duplication d'une pièce, d'un sous-ensemble ou d'un produit existant, sans dessins, documentation ou modèle informatique est connu sous le nom de rétro-ingénierie. La rétro-ingénierie est également définie comme le processus d'obtention d'un modèle CAO géométrique à partir de points 3D acquis en scannant/numérisant des pièces/produits existants. Le processus de capture numérique des entités physiques d'un composant, appelé la rétro-conception, est souvent défini par les chercheurs en fonction de leur

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

tâche spécifique (Motavalli&Shamsaasef 1996). Abella et al. (1994) ont décrit La rétro-conception comme "le concept de base de la production d'une pièce basée sur un modèle original ou physique sans l'utilisation d'un dessin technique". Yau et al. (1993) définissent La rétro-conception comme le "processus de récupération d'une nouvelle géométrie à partir d'une pièce fabriquée en numérisant et en modifiant un modèle CAO existant".

La rétro-conception inverse est maintenant largement utilisé dans de nombreuses applications, telles que la fabrication, le design industriel, la conception et la reproduction de bijoux. Par exemple, lorsqu'une nouvelle voiture est lancée sur le marché, les fabricants concurrents peuvent en acheter une et la démonter pour savoir comment elle a été. Construit et son fonctionnement. Dans génie logiciel, un bon code source est souvent une variation d'un autre bon code source. Dans certaines situations, comme le style automobile, les concepteurs donnent forme à leurs idées en utilisant de l'argile, du plâtre, du bois ou du caoutchouc mousse, mais un modèle CAO est nécessaire pour fabriquer la pièce. Au fur et à mesure que les produits deviennent de forme plus organique, la conception en CAO devient plus difficile et il n'y a aucune garantie que la représentation CAO reproduira exactement le modèle sculpté.

La rétro-conception apporte une solution à ce problème car le modèle physique est la source d'informations pour le modèle CAO. C'est ce qu'on appelle aussi le processus physique-numérique illustré à la figure 1.2. Une autre raison de La rétro-conception est de réduire les temps de cycle de développement de produits. Dans un marché mondial extrêmement concurrentiel, les fabricants recherchent constamment de nouvelles façons de raccourcir les délais de commercialisation d'un nouveau produit. Le

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

développement rapide de produits (RPD) fait référence aux technologies et techniques récemment développées qui aident les fabricants et les concepteurs à répondre aux exigences d'un temps de développement de produit raccourci. Par exemple, les entreprises de moulage par injection doivent raccourcir l'outil et la matrice [01]



Figure 1.2. Processus physique-numérique

Temps de développement de façon drastique. En utilisant La rétro-conception, un produit physique tridimensionnel ou une maquette en argile peut être rapidement capturé sous forme numérique, remodelé et exporté pour un prototypage/outillage rapide ou une fabrication rapide à l'aide de techniques d'usinage CNC multiaxes.

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

I.4-Pourquoi utiliser la rétro-ingénierie ?

Voici quelques-unes des raisons d'utiliser La rétro-conception :

- Le fabricant d'origine n'existe plus, mais un client a besoin du produit, par exemple, des pièces de rechange d'avion requises généralement après qu'un avion a été en service pendant plusieurs années.
- Le fabricant d'origine d'un produit ne fabrique plus le produit, par exemple, le produit d'origine est devenu obsolète.
- La documentation de conception originale du produit a été perdue ou n'a jamais existé.
- Créer des données pour remettre à neuf ou fabriquer une pièce pour laquelle il n'existe pas de données CAO, ou pour laquelle les données sont devenues obsolètes ou perdues.
- Inspection et/ou contrôle qualité Comparaison d'une pièce fabriquée à sa description CAO ou à un article standard.
- Certaines mauvaises caractéristiques d'un produit doivent être éliminées, par exemple, une usure excessive peut indiquer où un produit doit être amélioré.
- Renforcer les bonnes caractéristiques d'un produit basé sur une utilisation à long terme.
- Analyser les bonnes et les mauvaises caractéristiques des produits concurrents.
- Explorer de nouvelles voies pour améliorer les performances et les fonctionnalités des produits.
- Création de données 3D à partir d'un modèle ou d'une sculpture

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

pour l'animation dans les jeux et les films.

- Création de données 3D à partir d'un individu, d'un modèle ou d'une sculpture pour créer, mettre à l'échelle ou reproduire une œuvre d'art.
- Documentation et mesures architecturales et de construction.
- Adapter des vêtements ou des chaussures à des individus et déterminer l'anthropométrie d'une population.
- Génération de données pour créer des prothèses dentaires ou chirurgicales, des parties du corps issues de l'ingénierie tissulaire ou pour la planification chirurgicale.
- Documentation et reproduction de scènes de crime.

La liste ci-dessus n'est pas exhaustive et il existe de nombreuses autres raisons d'utiliser l'ingénierie inverse que celles documentées ci-dessus. **[01]**

I.5- Les processus générique :

Les processus générique de La rétro-conception est un processus en trois phases, comme le montre la figure 1.3. Les trois phases sont la numérisation, le traitement des points et le développement de modèles géométriques spécifiques à l'application. La stratégie de La rétro-conception doit prendre en compte les éléments suivants : **[01]**

- Raison de La rétro-conception d'une pièce
- Nombre de pièces à numériser – simples ou multiples
- Taille de la pièce - grande ou petite
- Complexité de la pièce - simple ou complexe
- Matériau de la pièce - dur ou mou
- Finition de la pièce - brillante ou terne
- Géométrie de la pièce - organique ou prismatique et interne ou externe
- Précision requise – linéaire ou volumétrique

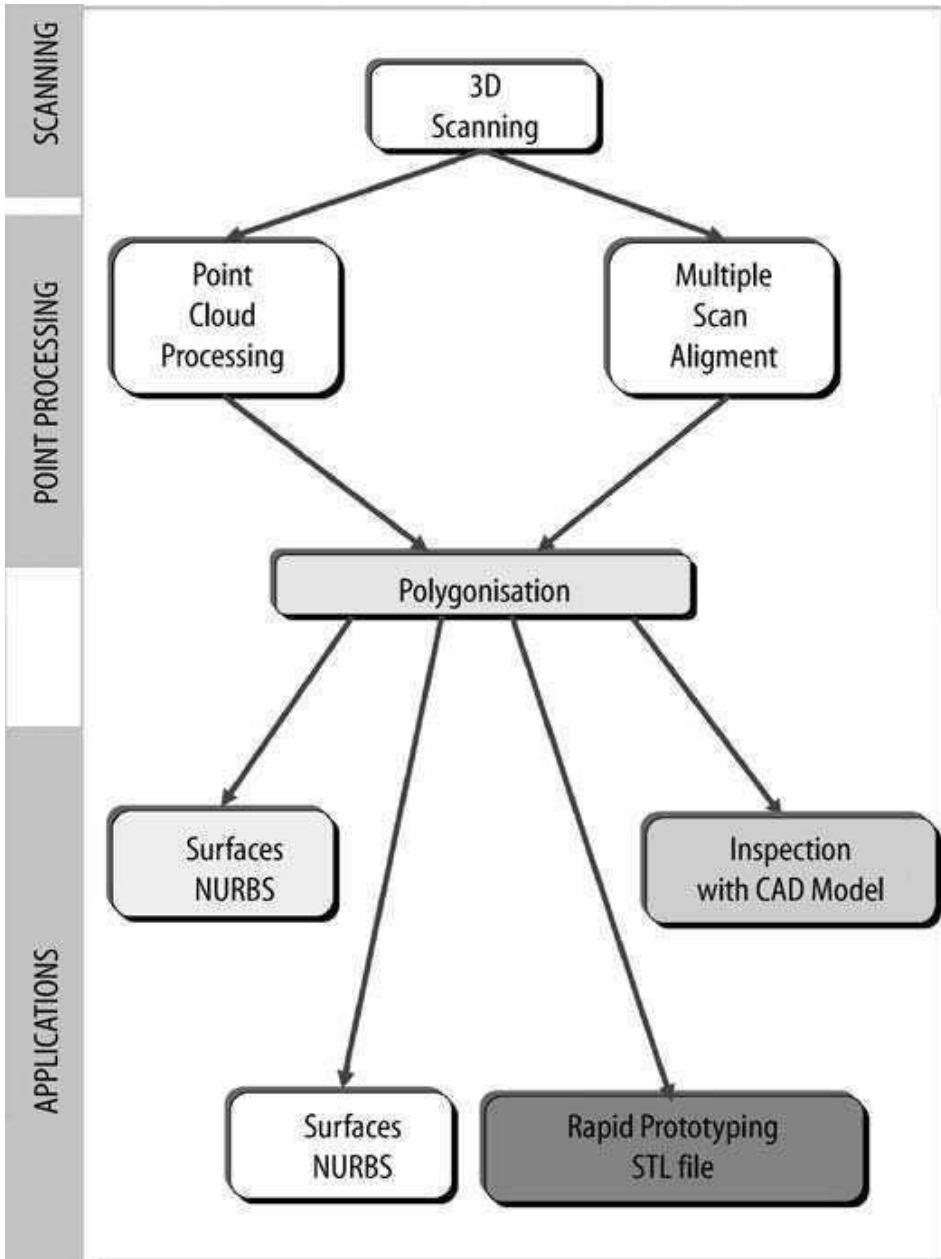


Figure1.3. La rétro-conception le processus générique

I.5.1- Phase 1 – Numération

Cette phase est impliquée dans la stratégie de numérisation - sélection de la technique de numérisation appropriée, préparation de la pièce à numériser et réalisation de la numérisation proprement dite pour capturer les informations décrivant toutes les caractéristiques géométriques de la pièce telles que les marches, les fentes, les poches et les trous. Des scanners tridimensionnels sont utilisés pour scanner la géométrie de la pièce, produisant des nuages de points qui définissent la géométrie de la surface. Ces dispositifs de numérisation sont disponibles en tant qu'outils dédiés ou en tant que compléments aux machines-outils à commande numérique par ordinateur (CNC) existantes. Il existe deux types distincts de scanners, contact et sans contact.

- Contacter les scanners

Ces dispositifs utilisent des sondes de contact qui suivent automatiquement les contours d'une surface physique (Figure 1.4). Sur le marché actuel, contactez la sonde les dispositifs de numérisation sont basés sur les technologies CMM, avec une plage de tolérance de +0,01 à 0,02 mm Cependant, selon la taille de la pièce scannée, les méthodes de contact peuvent être lentes car chaque point est généré séquentiellement à l'extrémité du palpeur. Les sondes des appareils tactiles doivent dévier pour enregistrer un point ; par conséquent, un degré de pression de contact est maintenu pendant le processus de balayage. Cette pression de contact limite l'utilisation de dispositifs de contact car les matériaux souples et tactiles tels que le caoutchouc ne peuvent pas être balayés facilement ou avec précision.



Figure 1.4. Sonde tactile à balayage de contact.

- Scanners sans contact

Une variété de technologies de numérisation sans contact disponibles sur le marché capturent des données sans contact physique avec les pièces. Les dispositifs sans contact utilisent des lasers, des optiques et des capteurs de dispositifs à couplage de charge (CCD) pour capturer des données ponctuelles, comme le montre la figure 1.5. Bien que ces appareils capturent de grandes quantités de données dans un laps de temps relativement court, il existe un certain nombre de problèmes liés à cette technologie de numérisation.

- La tolérance typique du balayage sans contact est de $\pm 0,025$ à $0,2$ mm.
- Certains systèmes sans contact ont des problèmes pour générer des données décrivant des surfaces parallèles à l'axe du laser.

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

- Les appareils sans contact utilisent la lumière dans le processus de capture de données. Cela crée des problèmes lorsque la lumière frappe des surfaces brillantes et, par conséquent, certaines surfaces doivent être préparées avec un revêtement temporaire de poudre fine avant la numérisation.



Figure 1.5. Dispositif de balayage optique

Ces problèmes limitent l'utilisation d'appareils de télédétection aux domaines de l'ingénierie, où la précision des informations générées est secondaire par rapport à la vitesse de capture des données. Cependant, à mesure que la recherche et le développement du laser dans la technologie optique se poursuivent, la précision du dispositif de balayage sans contact disponible dans le commerce commence à s'améliorer.

Le résultat de la phase de balayage est des ensembles de données de nuages de points dans le format le plus pratique. En règle générale, le logiciel RE fournit une variété de formats de sortie tels que bruts (valeurs X, Y, Z séparées par des espaces ou des virgules).

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

I.5.2-Phase 2–Traitement des points

Cette phase consiste à importer les données du nuage de points, à réduire le bruit dans les données collectées et à réduire le nombre de points. Ces tâches sont effectuées à l'aide d'une gamme de filtres prédéfinis. Il est extrêmement important que les utilisateurs aient une très bonne compréhension des algorithmes de filtrage afin qu'ils sachent quel filtre est le plus approprié pour chaque tâche. Cette phase nous permet également de fusionner plusieurs ensembles de données de numérisation. Parfois, il est nécessaire d'effectuer plusieurs numérisations de la pièce pour s'assurer que toutes les caractéristiques requises ont été numérisées. Cela implique de faire tourner la pièce ; par conséquent, chaque donnée de numérisation devient très cruciale. La planification de plusieurs scans a un impact direct sur la phase de traitement des points. Une bonne planification des données pour les balayages multiples réduira l'effort requis dans la phase de traitement des points et évitera également l'introduction d'erreurs dues à la fusion de plusieurs données de balayage. Le résultat de la phase de traitement des points est un ensemble de données de nuage de points propre et fusionné dans le format le plus pratique. Cette phase prend également en charge la plupart des formats propriétaires mentionnés ci-dessus dans la phase de numérisation.

I.5.3 -Phase 3 -Développement du modèle géométrique d'application

De la même manière que les développements dans les technologies de prototypage rapide et d'outillage contribuent à réduire considérablement le temps nécessaire pour générer des représentations physiques à partir de modèles CAO, les technologies RE actuelles contribuent à réduire le temps de création de modèles CAO électroniques à partir de

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

représentations physiques existantes. . Le besoin de générer des informations CAO à partir de composants physiques apparaîtra fréquemment tout au long de tout processus d'introduction de produit.

La génération de modèles CAO à partir de données ponctuelles est probablement l'activité la plus complexe au sein de RE, car de puissants algorithmes d'ajustement de surface sont nécessaires pour générer des surfaces qui représentent avec précision les informations tridimensionnelles décrites dans les ensembles de données de nuages de points. La plupart des systèmes de CAO ne sont pas conçus pour afficher et traiter de grandes quantités de données ponctuelles ; par conséquent, de nouveaux modules RE ou des progiciels discrets sont généralement nécessaires pour le traitement des points. La génération de données de surface à partir d'ensembles de données de nuages de points est encore un processus très subjectif, bien que des algorithmes basés sur les caractéristiques commencent à émerger qui permettront aux ingénieurs d'interagir avec les données de nuages de points pour produire des modèles solides complets pour les environnements CAO actuels.

Les applications de La rétro-conception pour générer des données CAO sont tout aussi importantes que la technologie qui les prend en charge. La décision d'un gestionnaire d'employer des technologies de la rétro conception doit être basée sur des besoins commerciaux spécifiques.

Cette phase dépend beaucoup de l'objectif réel de La rétro-conception. Par exemple, si nous scannions un outil de moulage par injection cassé pour produire un nouvel outil, nous serions intéressés par le modèle géométrique et également par les données du code ISO G qui peuvent être utilisées pour produire un outil de remplacement dans les plus brefs délais à l'aide d'un multi -machine CNC à axes. On peut également utiliser La rétro-conception pour analyser « tel que conçu » à « tel que fabriqué ».

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

Cela implique l'importation du modèle CAO tel que conçu et la superposition de l'ensemble de données de nuage de points numérisé de la pièce fabriquée. Le logiciel de La rétro-conception permet à l'utilisateur de comparer les deux ensembles de données (tel que conçu à tel que fabriqué). Ce processus est également utilisé pour l'inspection des pièces fabriquées. L'ingénierie inverse peut également être utilisée pour scanner les articulations de la hanche existantes et pour concevoir de nouvelles articulations de hanches artificielles autour de données pelviennes spécifiques au patient.

La sortie de cette phase est un modèle géométrique dans l'un des formats propriétaires tels que IGES, VDA, STL, DXF, OBJ, VRML, ISO G Code, etc.

Ce chapitre a défini le terme de La rétro-conception« ingénierie inverse » suivi des raisons d'utiliser La rétro-conception. Il a également introduit la stratégie de La rétro-conception, les trois phases du processus générique de La rétro-conception, le balayage avec et sans contact, le traitement ponctuel et le développement du modèle géométrique d'application.

I.6-Les étapes de la rétro-ingénierie

Le processus de rétro-conception passe souvent par les mêmes phases. Il peut varier avec les outils qu'on utilise, mais les grandes lignes restent les mêmes [02] :

1. **On amalgame de l'information** : Il existe différentes méthodes. L'une des plus communes est l'utilisation d'un scanner 3D. Pour les objets plus simples, on peut tout à fait prendre des mesures ou des photos.
2. **Le post-traitement** : Quand on utilise un scanner 3D, les données qu'on obtient en sortie sont loin d'être exploitables en l'état. Il s'agit d'un nuage

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

de points ou d'une surface de polygones qu'il faudra dégrossir et nettoyer, afin de les rendre exploitables en conception.

3. **La conception** : Il y a à cette étape des actions qui seront dépendantes de l'objectif que l'on s'est donné au départ (reproduction à l'identique, modifications, améliorations, contrôle qualité ?). Le dénominateur commun sera d'avoir un modèle numérique dans un format exploitable par des logiciels de conception assistée par ordinateur ou CAO.



Figure 1.6. Dispositif de balayage optique

Explorons plus en détails ces différentes étapes.

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

I.6.1-Etape 1 : Obtenir de l'information



Figure 1.7. Scanners3D

Quand l'objectif, est de définir l'enveloppe géométrique d'un objet d'une façon précise, rien ne peut battre un scanner 3D. Le scanner va scruter l'extérieur de l'objet dans ses moindres détails et va pouvoir précisément en générer une version digitale.

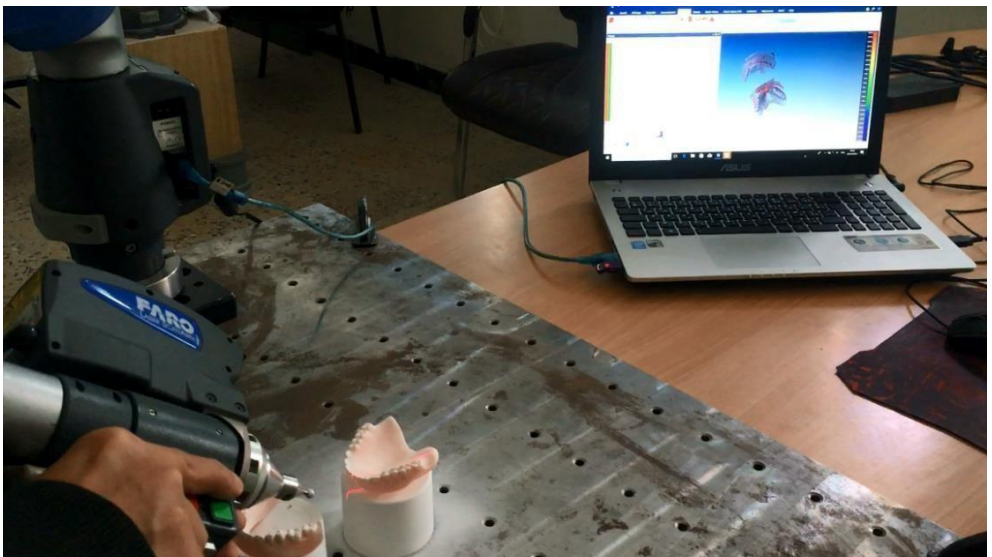


Figure 1.8. Scanners3Dd'uneprothèse dentaire

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

I.6.2-Etape 2 : Le post-traitement

Utiliser un bon scanner c'est déjà bien, mais c'est loin d'être suffisant. Une fois qu'on a obtenu suffisamment de données géométriques sous forme de nuage de points ou de surface polygonales, il y a du ménage à faire. On doit parfois combler les déchirures sur les surfaces, aplanir, corriger, réparer... C'est une étape souvent chronophage sur les objets complexes. On peut si l'on souhaite imprimer l'objet à cette étape. Car les fichiers en impression 3D utilisent une géométrie basique sous forme de surface (mesh). Mais en rétro conception c'est un passage obligé avant la partie la plus complexe et la plus intéressante.

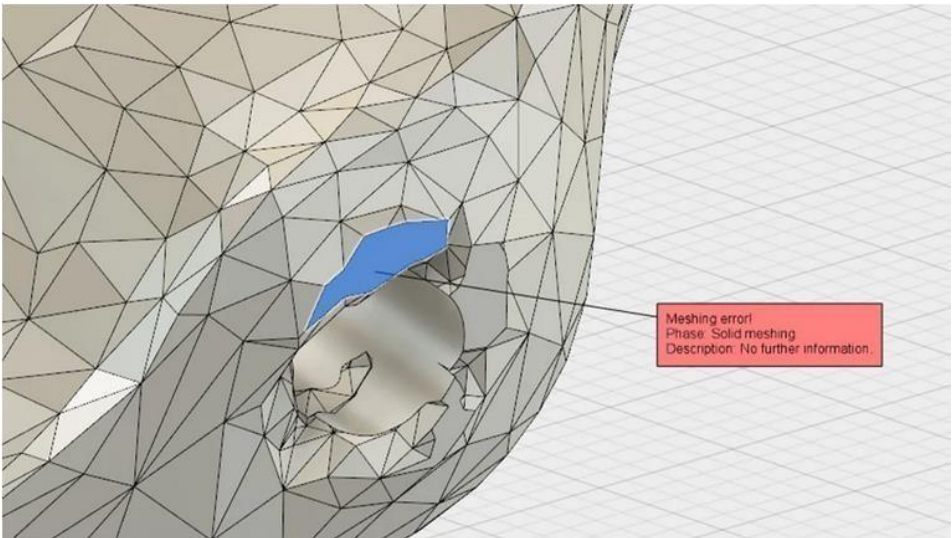


Figure 1.9. Post traitement

I.6.3-Etape 3 : La conception

Quand la surface géométrique est satisfaisante, on peut commencer la conception. Il va s'agir de convertir une surface de polygones en une série d'objets techniques assemblés les uns aux autres pour donner vie à notre vision.



Figure 1.11. Conception3D

I .6.4-Etape finale : La production

La conception est achevée, les dimensions sont validées, quel plaisir d'imprimer le premier prototype.



Figure 1.12. Impression3D

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

I.7 -Avantages de l'utilisation de la rétro-ingénierie en fabrication additive

L'utilisation de la rétro-conception en fabrication additive présente de nombreux avantages. Parmi les avantages les plus importants, on peut citer :

- La possibilité de modifier les designs existants et d'améliorer les produits. La rétro-conception permet de modifier les designs des pièces et d'introduire des améliorations, ce qui peut se révéler très utile en fabrication additive, où les modifications sont souvent plus faciles à réaliser que sur une machine conventionnelle.
- La capacité à fabriquer des pièces complexes. Grâce à la rétro-conception, il est possible de fabriquer des pièces complexes qui ne pourraient pas être produites avec une machine conventionnelle. De plus, la fabrication additive permet de fabriquer des pièces sans défauts et avec une qualité supérieure.
- La possibilité de produire des pièces personnalisées. Grâce à la rétro-conception, il est possible de produire des pièces personnalisées qui correspondent exactement aux besoins du client.

I.8 -Exemples de cas où la rétro-conception peut être utilisée

La rétro-conception est un processus très utile et polyvalent, qui peut être utilisé dans de nombreux cas. Parmi les cas les plus courants, on peut citer :

- La reconstruction d'un objet à partir des plans originaux (s'ils existent). Si les plans de pièces sont perdus ou inexistantes, la rétro-conception permet de reconstruire une pièce à partir des informations disponibles.

Chapitre I: Généralité sur la rétro conception

– La numérisation d’un objet existant pour créer un modèle CAO. La rétro-conception permet de numériser un objet et de générer une représentation numérique de son contour. Cette représentation peut ensuite être utilisée pour créer un modèle CAO de la pièce à reconstruire.

-Le développement d’outils et d’accessoires. La rétro-conception est souvent utilisée pour développer des outils et des accessoires qui n’existent pas encore. Ces outils et accessoires peuvent ensuite être utilisés en fabrication additive.

– La modification d’une pièce existante. La rétro-conception permet de modifier une pièce existante en introduisant des modifications qui amélioreront sa qualité ou sa fonctionnalité.

La rétro-conception est un processus polyvalent et très utile qui peut être utilisé dans de nombreux cas. Elle permet notamment de modifier les designs existants, de fabriquer des pièces complexes ou de produire des pièces personnalisées. En fabrication additive, elle présente de nombreux avantages, comme la possibilité de fabriquer des pièces sans défauts ou de modifier facilement les designs existants.

Chapitre II
Les méthodes et Processus de la
rétro conception

II .1- Introduction :

La rétro conception est combinée plusieurs méthodes de reproduit de l'objet physique chaque méthode (reconstruction à partir de scanning laser 3D, à partir l'image, par MMT,...).

II .2- Les techniques de mesures avec et sans contacts [03] :

- Le principe de la digitalisation d'un composant réel est associé à la mesure et au relevé topologique de celui-ci
- Il existe deux techniques de mesures :
 - Techniques avec contact physique entre le composant et le moyen de mesures
 - Techniques sans contact physique entre le composant et le moyen de mesures
- La digitalisation souhaitée peut être surfacique (relevé topologique des surfaces frontières) ou volumique

II .2.1- Méthodes directes :

- Les méthodes directes consistent à faire un relevé d'une dimension à partir d'une référence
- On peut citer différents moyens de mesures basées sur ce principe :
 - Appareil à traits : Le mètre
 - Appareils à vernier : le pied à coulisse, colonnes de mesures, trusquin, ...
 - Appareils à vis micrométrique : le micromètre



Figure II .1. Moyens de mesures directes

II .2.2- Méthodes indirectes :

- Les méthodes indirectes sont associées à un relevé à l'aide d'un capteur de l'écart entre une pièce à mesurer et un étalon (pièce de référence).
- C'est donc une mesure par comparaison
- On utilise alors des comparateurs (comparateurs à levier, palpeurs 3D, MMT, ...)

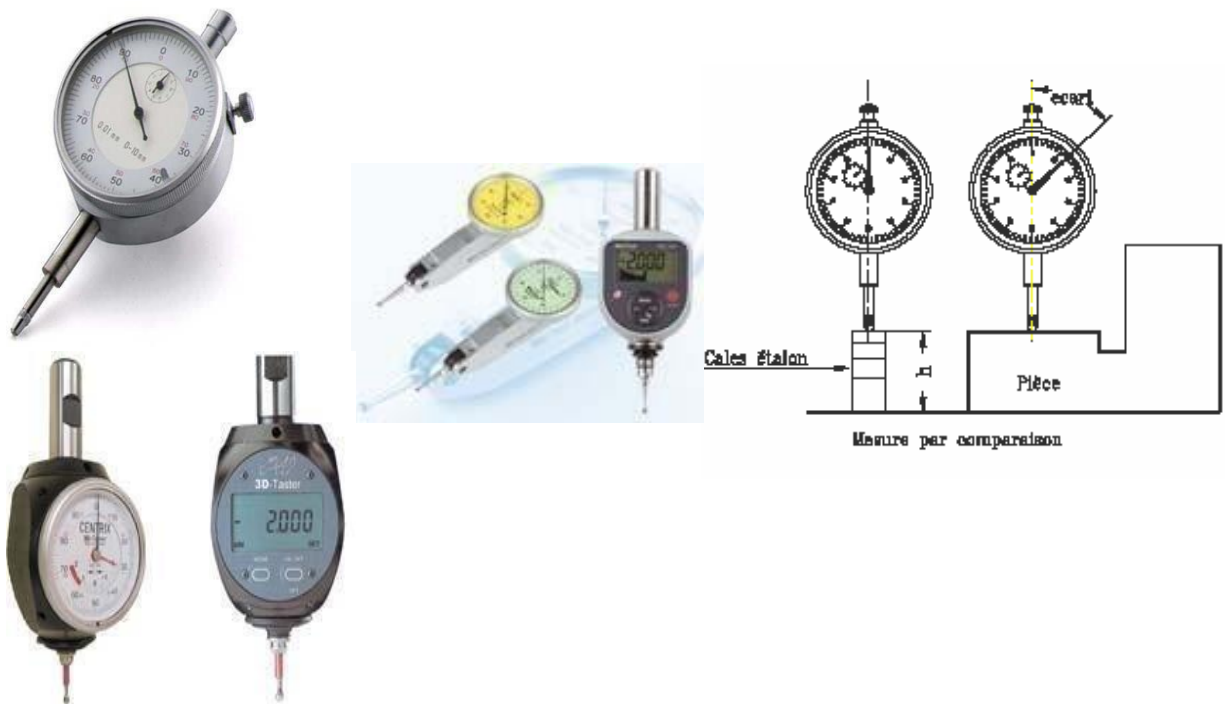


Figure II .2. Moyens de mesures indirectes

II .2.3- Méthodes indirectes –machines à mesures tridimensionnelle :

- Les machines à mesurer tridimensionnelle par contact consistent à venir mesurer la géométrie à l'aide de palpeurs
- Ces palpeurs (dynamiques ou statiques) sont constitués d'une tête orientable, d'une extension, d'un capteur et d'un stylet
- Le stylet est constitué en son extrémité d'une sphère calibrée qui servira à la mesure
- Le système MMT connaît alors pour chaque mesure la position du centre de la sphère, i.e. un point de mesure.

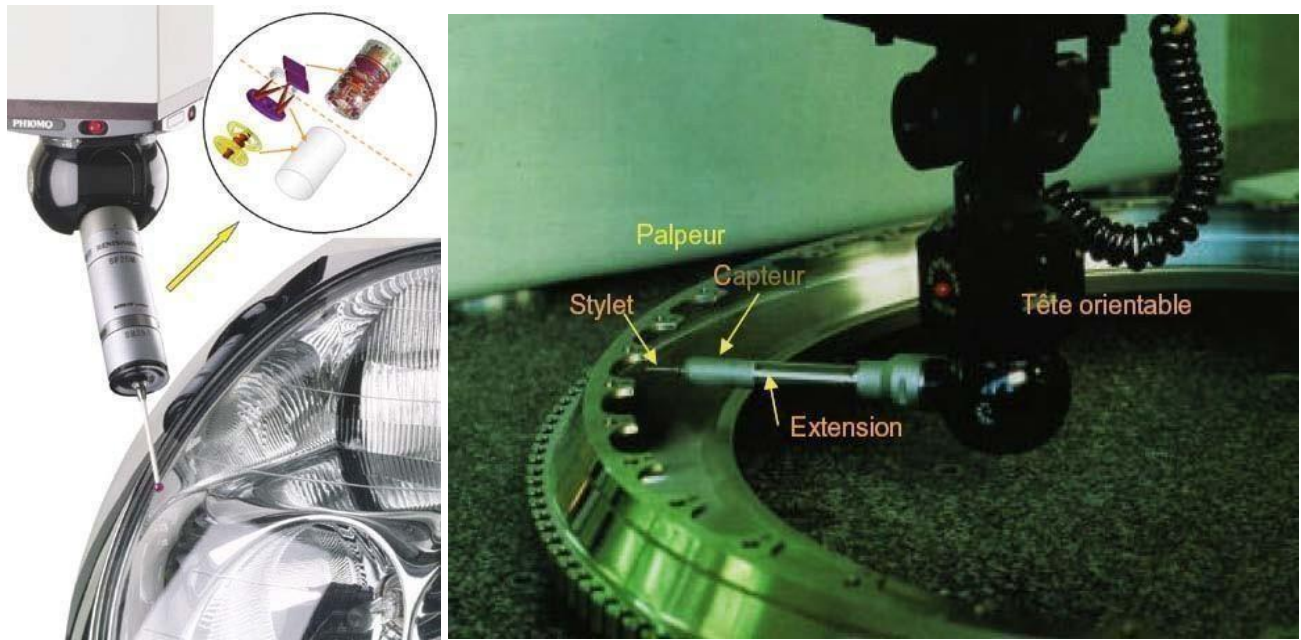


Figure II .3. Machines à mesures tridimensionnelle

II .2.4- Méthodes avec contact : inconvénients pour la reconstruction de géométries :

Les méthodes de mesure par contact sont nombreuses

Néanmoins, elles peuvent être longues et fastidieuses et permettent de définir que partiellement la géométrie

En effet, même en utilisant une MMT classique, il est nécessaire de définir et de mettre en place la gamme opératoire de métrologie et cela pour un nombre de points limités

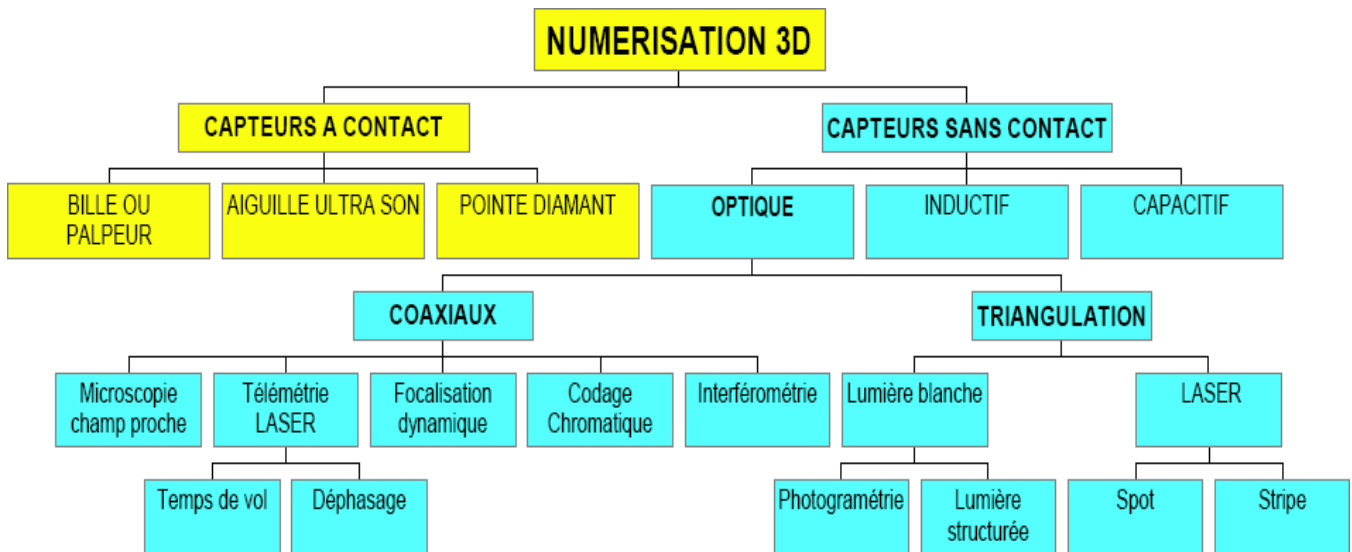
Dans le cas de la reconstruction de géométries, l'utilisation de ces méthodes devient très vite caduque

Existe-t-il alors d'autres techniques ?

Dans la suite on présentera essentiellement les méthodes optiques comme moyens utilisés pour faire de la reconstruction de composants

Néanmoins, il existe d'autres méthodes de mesures sans contacts : magnétique, ultrasons, capteurs inductifs, capacitifs, magnéto-acoustique, radar, ...

II .2.5- Méthodes de numérations 3D – Méthodes optique :



II .2.5.1- Techniques de numérations sans contacts :

II .2.5.2- Principe des Méthodes optique :

- Pour réaliser capteur optique, on retrouve toujours les mêmes éléments à savoir
 - Une source lumineuse
 - Un détecteur de lumière
 - Des optiques de focalisation

II .2.5.3- Les sources lumineuses :

- La source lumineuse peut être naturelle mais bien souvent ils'agit d'une source artificielle
- Ces sources artificielles sont souvent des LED ou des sources lasers

II .2.5.4- Les détecteurs :

- Le détecteur le plus largement utilisé est la **photodiode**
- Cette cellule transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique
- Utilisée en mode photoconducteur, une photodiode présente un temps de réponse très faible
- Assemblées en barrettes, elles permettent de mesurer une répartition d'intensité sur une ligne
- Les barrettes CCD (Charge Coupled Device) permettent de segmenter la ligne en plusieurs milliers d'éléments

- Les matrices CCD (plusieurs barrettes) réalisent la même opération sur une surface dont le nombre peut atteindre plusieurs millions. Ce nombre augmente avec l'évolution des détecteurs ...

II .2.5.5- Les pièces à digitaliser :

- Les pièces à éclairer **absorbent**, **diffusent** et/ou **réfléchissent** la lumière incidente selon leur couleur, leur état de surface et leur nature (transparente, opaque, isolante ou conductrice)

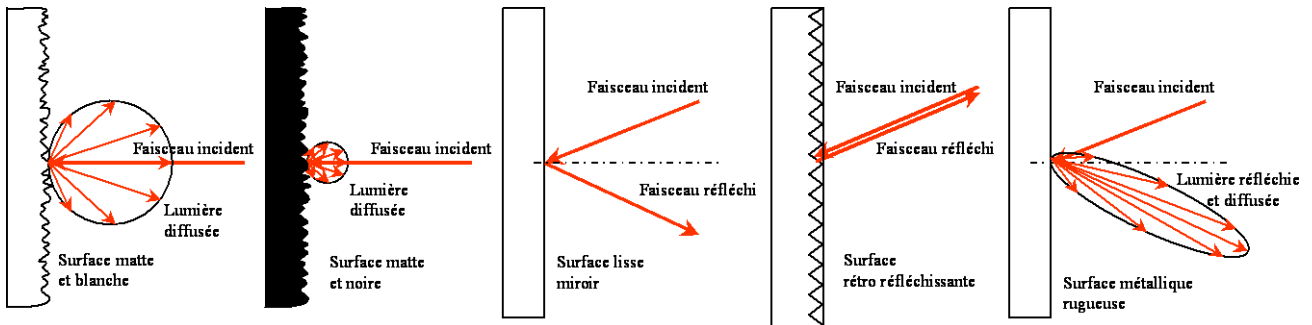


Figure II .4. Les pièces à éclairer absorbent, diffusent et/ou réfléchissent

- Donc selon les caractéristiques de la pièce à digitaliser, il sera peut être nécessaire de prendre des précautions particulières selon le couple pièce/système optique utilisé.

II .2.6- Méthodes par triangulation :

- Les méthodes de mesures de position des points par triangulation sont basées sur la détermination de l'intersection de deux directions
 - Direction de l'éclairage du point à mesurer sur la pièce (par ex : la direction du faisceau laser)
 - Direction d'où l'on voit le point éclairé du système de mesure (la direction de visualisation de la caméra CCD).

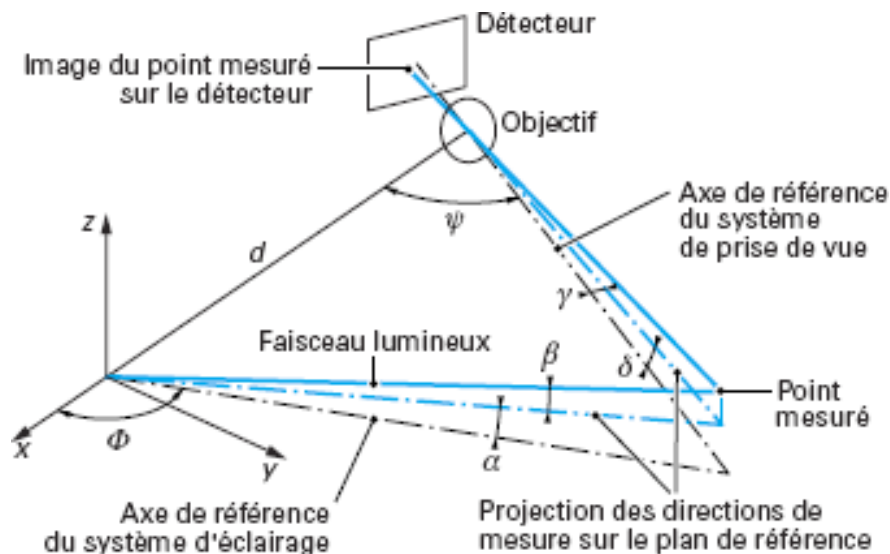


Figure II .5. Mesures de position des points par triangulation

$$x = \frac{d \tan(\Psi + \gamma)}{\tan(\Phi + \alpha) - \tan(\Psi + \gamma)} \quad d$$

$$y = \frac{d}{\tan\left(\Phi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) - \tan\left(\Psi + \alpha, \beta \text{ et } \gamma\right)} \quad \Phi$$

$$z = \sqrt{x^2 + y^2} \tan \beta$$

distance entre le dispositif de projection de faisceaux lumineux et le système de prise de vue,
direction de l'axe de référence du système d'éclairage,
direction de l'axe du système de prise de vue,
angles qui varient en fonction de la position du point mesuré.

II .2.6.1- Principe :

- La diode laser S émet un faisceau droit à l'aide d'un collimateur (lentille convergente L1)
- Après réflexion, le rayon incident MM', focalisé grâce à une lentille convergente L2, est capté par une ligne de cellules photosensibles
- Le capteur photosensible est placé à la même altitude que la diode laser, mais légèrement décalé latéralement de telle sorte qu'un changement d'altitude d'un objet devant le collimateur se traduise par un changement de position du rayon incident au niveau du capteur photosensible.

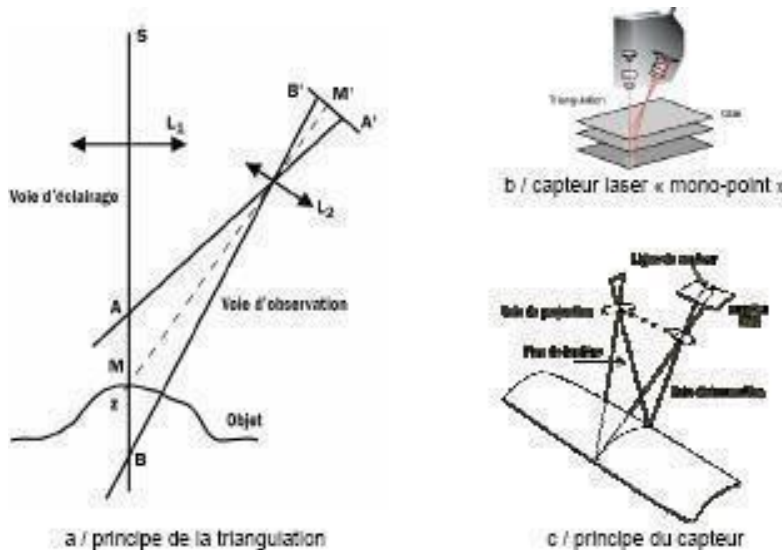


Figure II .6- Principe de Méthodes par triangulation

II .2.6.2- Méthodes par projection de franges (lumière structurée) :

- Le principe des méthodes par projection de franges est d'utiliser un projecteur de franges avec un ou deux caméras.
- Le projecteur permet d'éclairer la pièce par des trames (franges) de pas de plus en plus fins afin de désigner les lignes à mesurer et permettre d'enlever les ambiguïtés de mesures.
- Le pas du réseau ne doit pas être trop fin afin d'éviter un effet de moiré qui pourrait perturber la mesure.

Chapitre II : Les méthodes et Processus de la rétro conception

- Les images sont alors mémorisées pour chaque réseaux de trames par la (ou deux) caméra(s)
- Le résultat de mesure procure un patch (nuage de points) de plusieurs millions de points (par ex : 4Millions de points pour le système ATOS de GOM) pour une position donnée
- La mesure dure quelques secondes et doit être répétée pour différentes positions
- Pour repositionner automatiquement toutes les digitalisations des cibles sont alors collées sur la structure de manière aléatoire.

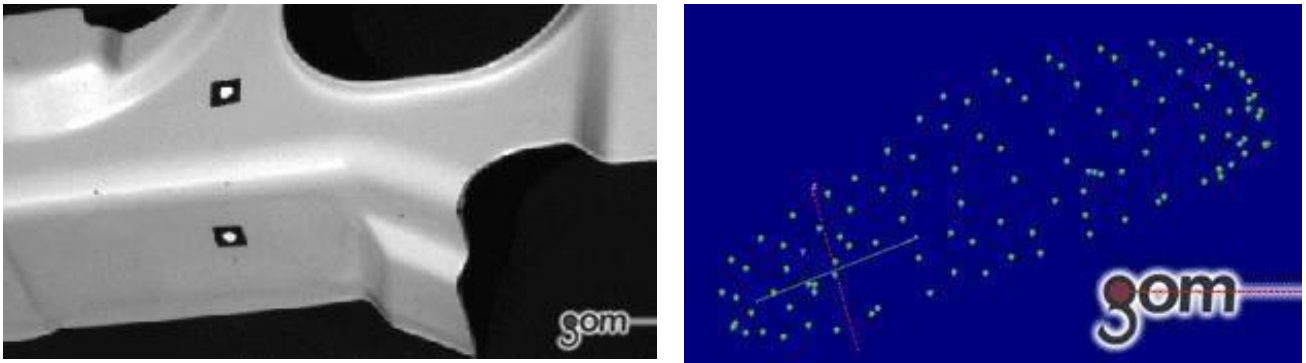


Figure II .7- Projecteur de Franges

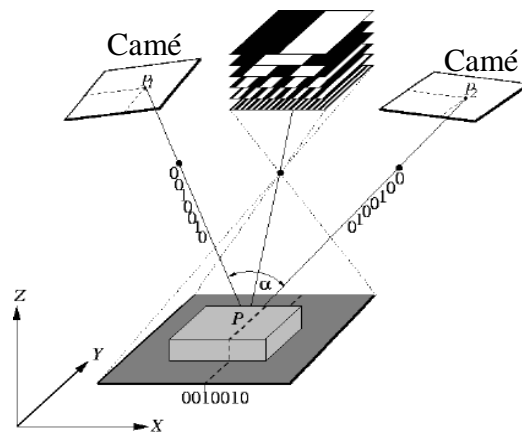


Figure II .8- Chaque point est identifié par sa phase



Figure II .9- exemples Méthodes par projection de franges

II.2.6.3- Stéréoscopie /photogrammétrie /vidéogrammétrie :

- La Stéréoscopie est l'ensemble des techniques mises en œuvre pour reproduire une perception du relief à partir de deux images planes
- Elle se base sur le fait que la perception humaine du relief se forme dans le cerveau lorsqu'il reconstitue une seule image à partir de la perception des deux images planes et différentes provenant de chaque œil.
- Le mot **photogrammétrie** vient de la grecque « photo » (lumière), « gamma » (quelque chose d'écrit ou de dessiné) et « metron » (mesure).
- Cette technique a pour but de déterminer les dimensions, les positions et la forme d'objets, à partir de clichés photographiques (points de vue stéréoscopique)
- Par combinaison mathématique, ces images fournissent les coordonnées 3D d'une scène
- La photogrammétrie est donc une technique de mesure par laquelle les coordonnées en trois dimensions des points d'un objet sont déterminées par des mesures faites sur une ou plusieurs images photographiques prises à partir de positions différentes
- Il est alors nécessaire de traiter l'ensemble des points de vue pour reconstituer l'image 3D
- Le principe de la **vidéogrammétrie** est basé sur celui de la photogrammétrie mais en remplaçant l'appareil photo numérique par une caméra numérique (donc une vidéo)
- Ceci permet un traitement en quasi-temps réel et une reconstruction rapide de la pièce

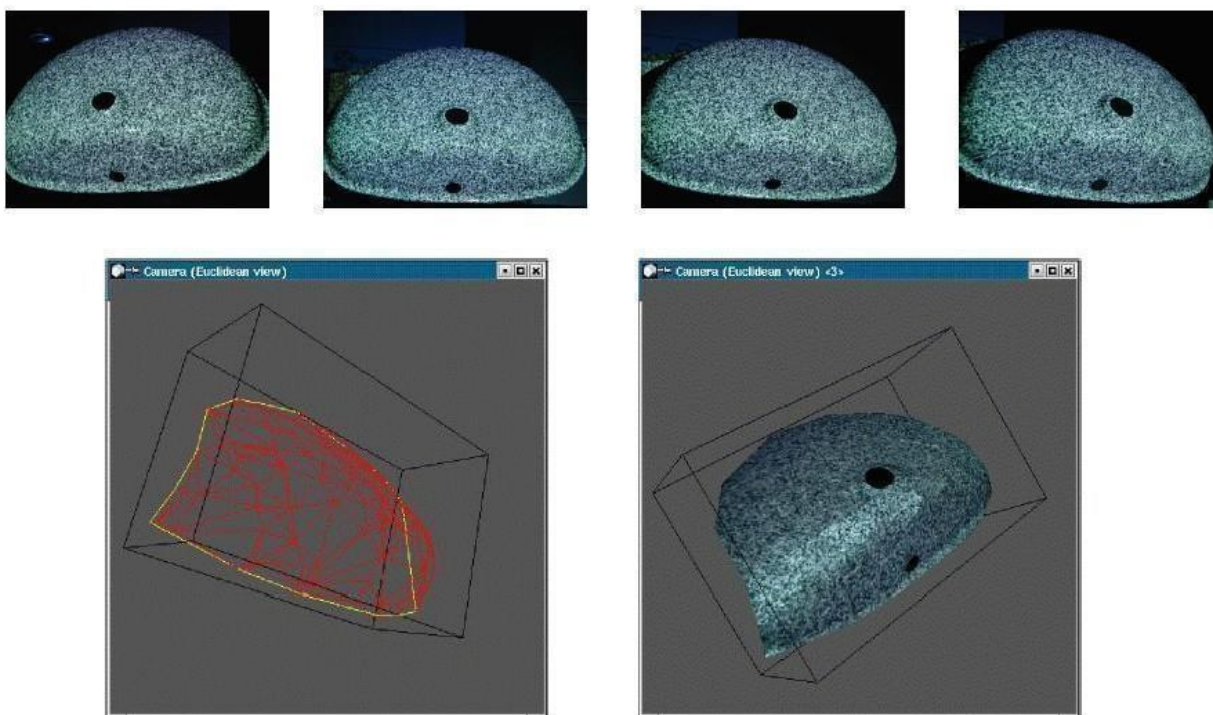


Figure II .10- vidéogrammétrie

II .2.6.4- Exemple de systèmes par photogrammétrie /vidéogrammétrie

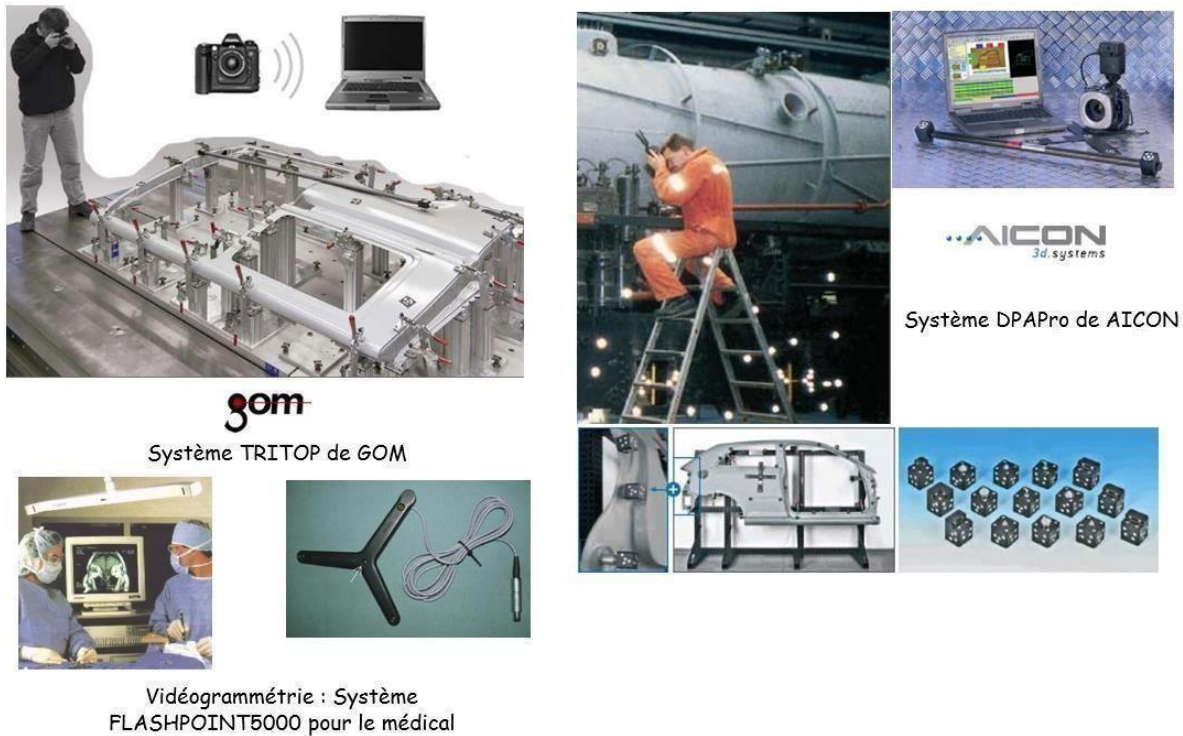


Figure II .11- Exemple de systèmes par photogrammétrie /vidéogrammétrie

II .2.7- Méthode par défocalisation (Shape from focus) :

- Les méthodes de défocalisation ou Shape from Focus regroupent les techniques reposant sur la mesure du flou.
- Lors du processus de formation des images, seuls les rayons réfléchis par l'objet à distance focale du centre optique convergent parfaitement sur le plan image.
- Cette convergence est à l'origine d'une zone nette, alors que l'on observe des zones floues pour les points situés en dehors du plan focal.
- La profondeur des points de l'image est déterminée en faisant varier la focale, ou bien en éloignant le capteur de l'objet.
- C'est le principe du microscope 3D Infinité Focus de la société ALICONA
- L'acquisition d'images, obtenues pour des hauteurs de focalisation différentes, permet de créer une image de profondeur.
- Le système de mesures est composé.
- d'une source lumineuse ponctuelle,
- d'une lentille de collimation qui permet de réaliser un faisceau parallèle.
- d'une lentille de focalisation (objectif à grande ouverture numérique) qui permet d'éclairer la pièce à mesurer avec un point lumineux très petit (de l'ordre de la résolution de l'appareil).

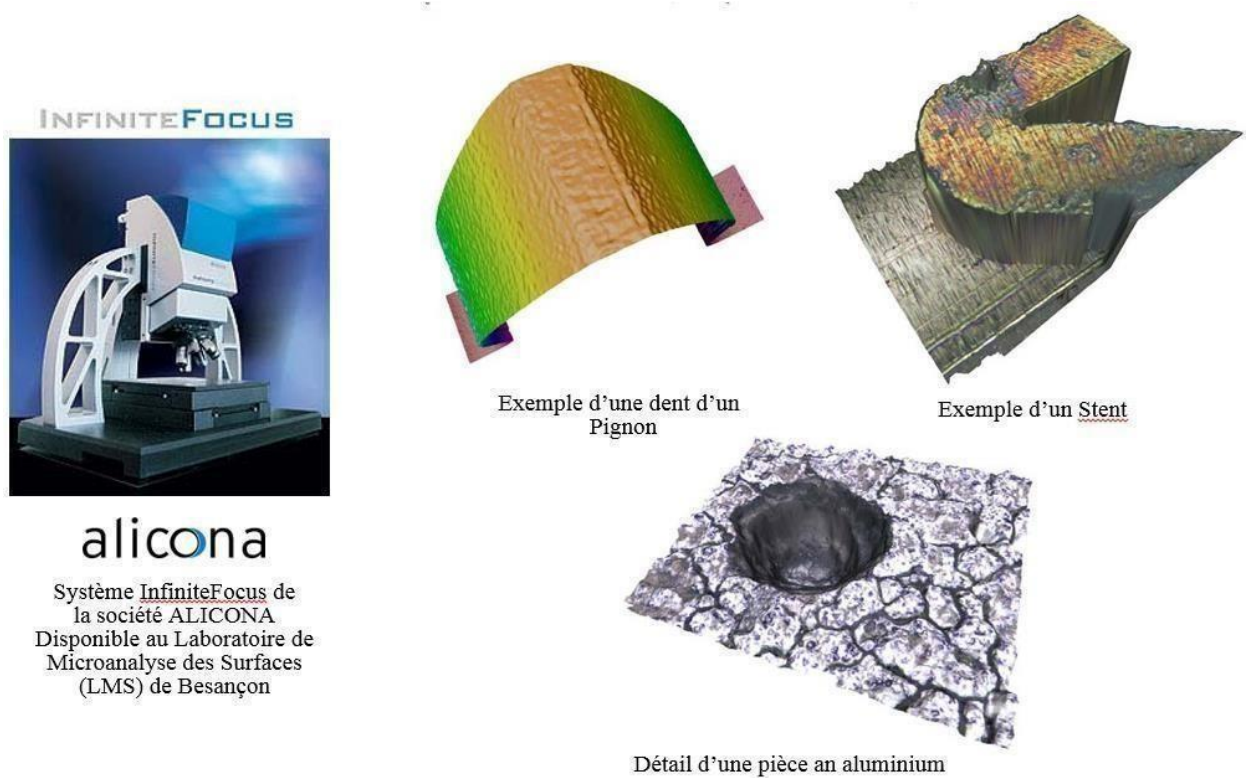


Figure II .12- Méthode par défocalisation

II .2.8- Système tracker (poursuite laser)

- Le principe des systèmes Tracker (suivis de position) est basé le suivi d'une cible mobile (déplacée manuellement ou par un système automatique)
- L'appareil de mesure émet signal lumineux sinusoïdal en direction de cette cible
- L'onde est alors réfléchié par la cible et le capteur mesure le retard de phase du signal réfléchi
- On mesure alors la distance quisépare le système de la cible et donc la position 3D de celle-ci



• Figure II .13- Système tracker

II .3- Outil de reconstruction

II .3.1 Qui faire des nuages de points :

- Une fois qu'une (ou plusieurs) des techniques de numérisation a été effectuée, que faire des de l'ensemble des nuages de points (quelques milliers à quelques millions de points) ?
- Il est donc nécessaire de posséder des outils de traitements de ces nuages de points
- Ces outils permettent :
 - L'alignement et le recalage des différents nuages de points,
 - Les corrections éventuelles : nettoyage, suppressions des aberrations
 - , lissage...
 - L'échantillonnage : l'ensemble des points n'est pas forcément
 - Transformation du nuage de points en maillage STL
 - Traitements du maillage : réduction du bruit, remplissage des trous, connexions
 - demaillages, ...
 - Fermeture du maillage
 - Création de surfaces et donc rétro-conception de la pièce digitalisée



II .3.2- Les principaux outils commerciaux de reconstruction : geomagic et rapidform

- Les principales industries des moyens de digitalisation ont pour la plupart développées des outils permettant de traiter les nuages de points (Metris, Leica, Steinbichler, ...)
- Néanmoins, deux logiciels se détachent dans le traitement des nuages de points : Geomagic et RapidForm
- Dans le cadre de l'AIP PRIMECA de Franche-Comté, l'outil utilisé est Geomagic
- Ces outils sont souvent séparés en deux :
 - Digitalisation/Traitements des Nuages : Geomagic Studio
 - Outils d'inspections : Geomagic Qualify
- Certains logiciels tels que CATIA V5 proposent des outils de traitements des nuages de points :

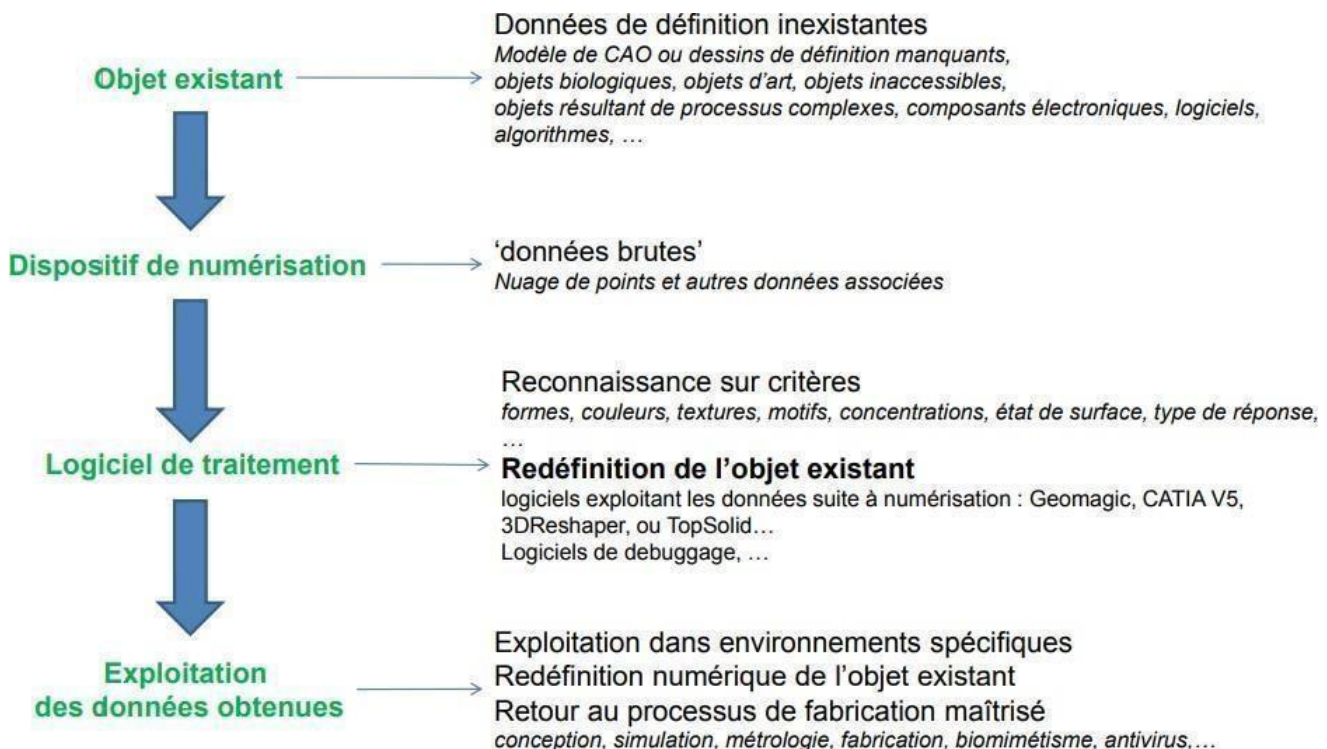
Chapitre II : Les méthodes et Processus de la rétro conception

- Digitized Shape Editor : Traitement des nuages de points
- Quick Shape Reconstruction : Reconstruction d'entités géométriques à partir des nuages traités
- Générative Shape Design : Reconstruction surfacique à partir des entités géométriques puis fermeture du volume pour obtenir une pièce volumique
- Dans le cadre des TP, nous utiliserons uniquement Geomagic Studio et Qualify

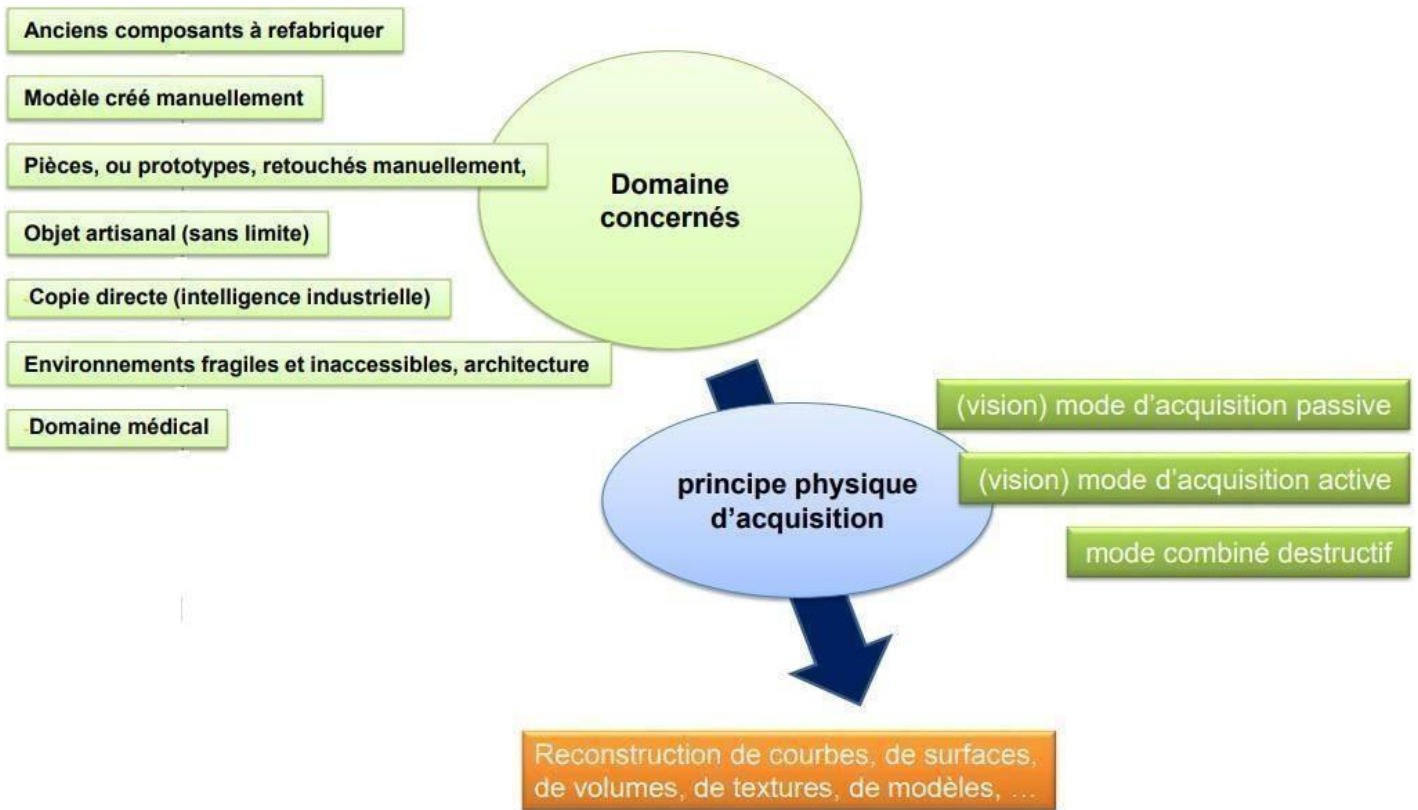
II .4- Les difficultés :

- Les méthodes de numérisation peuvent être assez simples et très rapide, notamment les méthodes par triangulation
- On notera donc que l'acquisition des nuages de points ne pose pas de problèmes lorsque l'on dispose du matériel nécessaire
- Par contre, le traitement des nuages de points et surtout la reconstruction des surfaces puis des volumes est bien plus complexe qu'il n'y paraît
 - La technicité est donc associée à l'outil logiciel

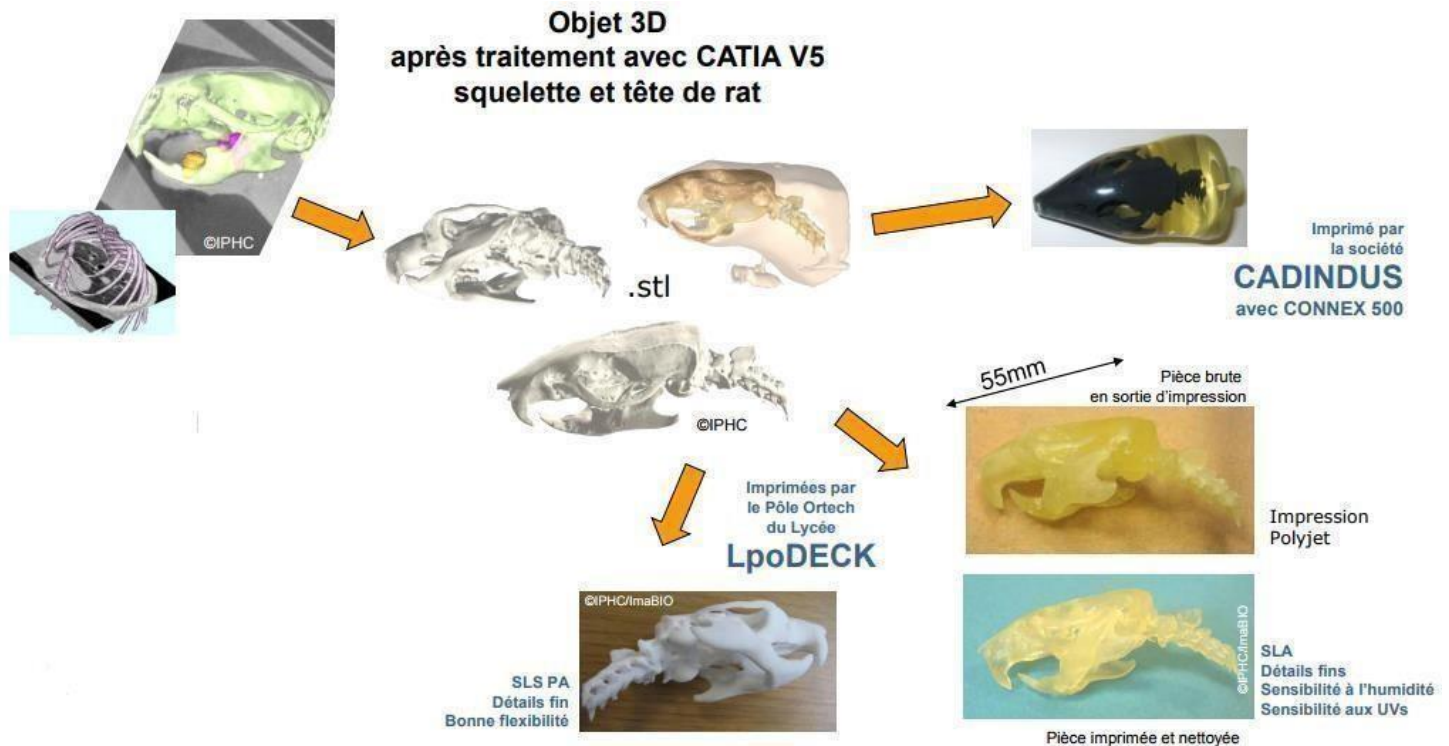
II .5 - Processus de rétro conception [04]



II .5.1- Processus de rétro conception en mécanique



II .5.2- Exploitation de la rétro conception sur petit animal



• Figure II .14- Exploitation de la rétro conception sur petit animal

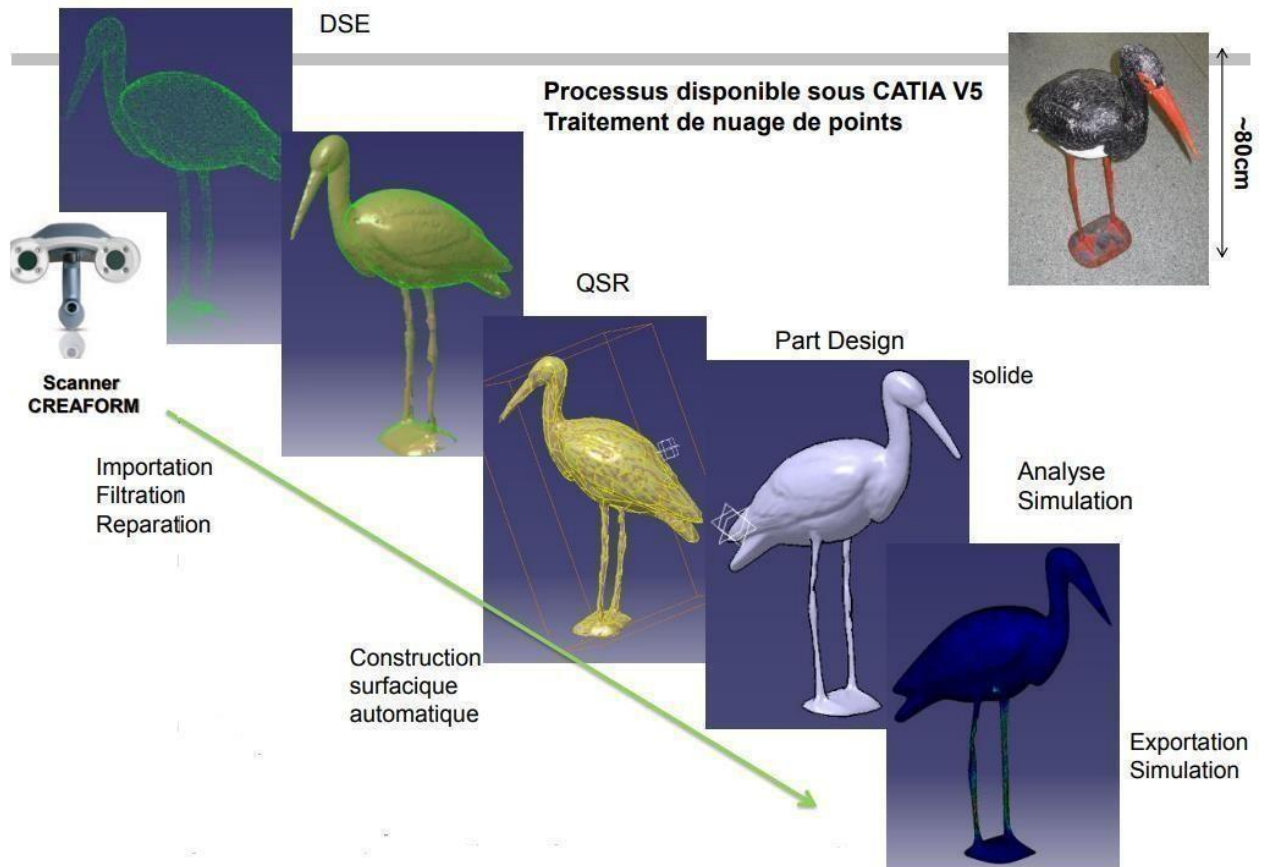


Figure II .15- Exploitation de la rétro conception sur petit animal

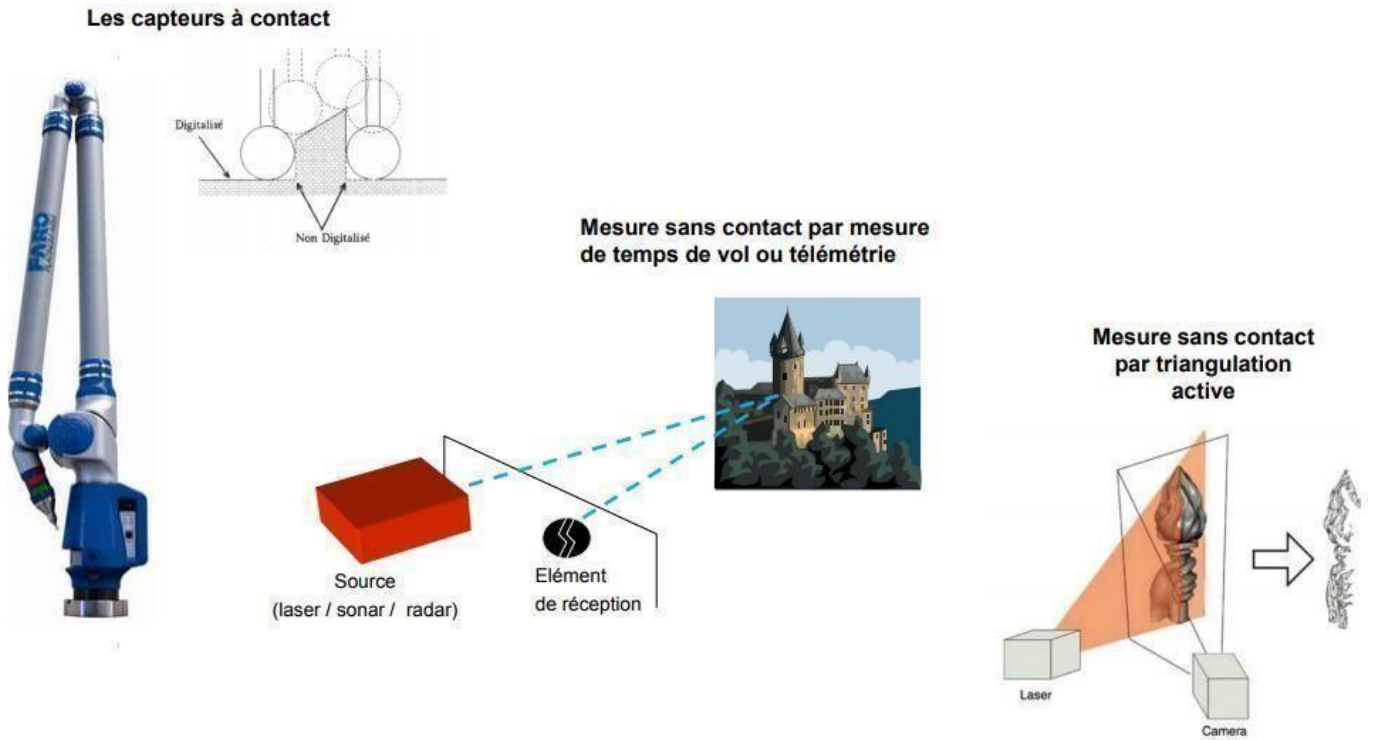
II .6- Modes d'acquisition

II .6.1 - (vision) mode d'acquisition passive



Figure II .16- mode d'acquisition passive

II.6.2- (vision) mode d'acquisition active



Source : E. Marx, <http://www.lyceedeck.fr/>

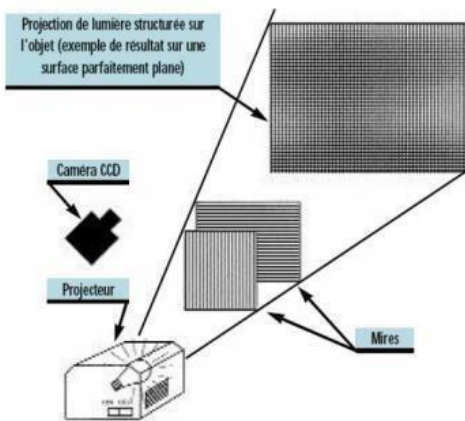
Figure II .17- mode d'acquisition active

Tomographe médical, IRM



Source image : <http://www.chjb.fr/services-de-soins/radiologie/>

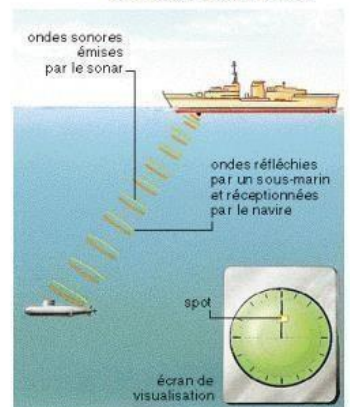
Utilisation de l'effet de Moiré



Utilisation des ultrasons



Utilisation des Ondes sonores



Source : <http://abc.son.free.fr/Emission-Reception-Son/Propagation-Ultrason.php>

Figure II .18- mode d'acquisition active

II .6.3 - Mode d'acquisition destructif



Vibratome Leica 1200

Tranchage d'échantillon



Source : LPODECK / Pôle Ortech
Société CGI CORP

Figure II .19- Mode d'acquisition destructif

II .7 Quelques exemples



Amlificateur sonore

Source : <http://blogs.cotemaison.fr/archiboom/2011/06/26/made-in-3d-%E2%80%93-design-et-impression-3d/>



Un dessin devient un objet 3D

Source : <http://journalmetro.com/dossiers/la-liste-du-lundi/338524/objets-3d/>



Souris ergonomique

Source : <https://www.makershop.fr/content/28-imprimante-3d-industrie-bureau-etude-ingenierie>



Nike Debuts Chaussure de football imprimée

Source : <http://mashable.com/2013/02/27/nike-3d-printed-cleat/>

Implants



Prothèse



Source : <http://www.treehugger.com/green-architecture/heavy-metal-meets-downloadable-designs-3d-printing-from-cad-to-metal.html>

Figure II .20- Quelques exemples

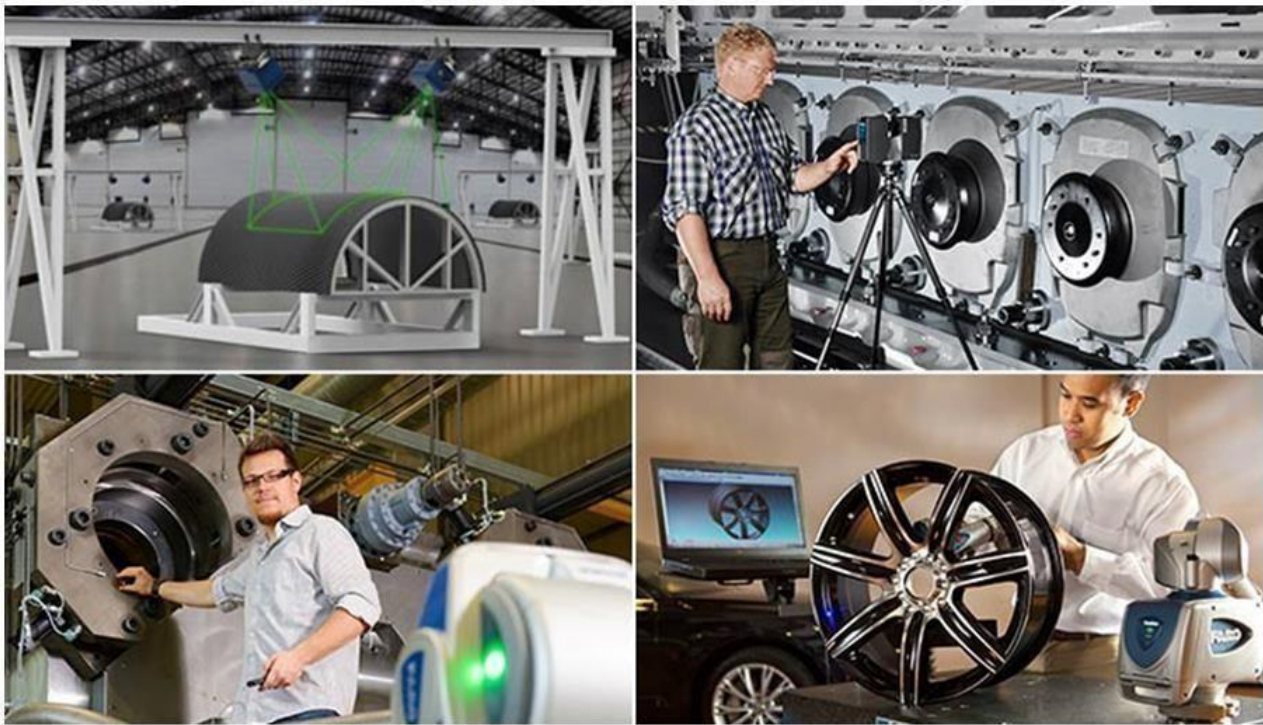


Figure II .21-Quelques exemples

*Chapitre III :
Généralité sur scanner 3D*

Chapitre III: Généralité sur scanner

III -1 Introduction

Le monde qui nous entoure est en trois dimensions les caméras traditionnelles et capteurs d'imagerie ne peuvent acquérir que deux dimensions c'est à dire sans informations de profondeur. Cette fondamentale restriction limite considérablement notre capacité d'étudier et de modéliser la complexité des objets du monde réel dans le monde numérique pour cela on utilise les scanners 3d qui nous permette d'obtenir des modèles à trois dimensions. dans ce chapitre on va parler de son historique et comment il s'est développé, puis nous parlerons de ses types et enfin Domaines d'utilisation.[5]

III -2 Les types de 3D Numériseurs et 3D Balayage Les technologies.

Il existe de nombreux types de scanners 3D et de technologies de numérisation 3D. Certains sont idéaux pour le balayage à courte portée tout en d'autres conviennent mieux au balayage à moyenne ou longue portée. Le scanner 3D et la technologie nécessaires pour numériser en 3D un très petit objet est très différent de le meilleur 3D scanner à 3D analyse un grand avion.

EMS utilise une large gamme de scanners 3D et de technologies de numérisation 3D, ce qui nous permet de sélectionner la meilleure numérisation 3D technologie ou combinaison de les technologies pour chaque projet.

Voici une bref contour de la 3D balayage les technologies et les types de 3D Scanners. [6]

III -2-1 Court Gamme 3D Numériseurs

Court Gamme Scanners 3D utilisent généralement un Laser triangulation ou Structuré Lumière technologie.

III -2-2 Laser basé 3D Numériseurs

Les scanners 3D à base de laser utilisent un processus appelé triangulation trigonométrique pour capturer avec précision une forme 3D comme des millions de points. Les scanners laser fonctionnent en projetant une ou plusieurs lignes laser sur un objet, puis en capturant sa réflexion avec un seul capteur ou plusieurs capteurs. Les capteurs sont situés à une distance connue de la source du laser. Préciser les mesures peuvent alors soit fait en calculant le réflexion angle de le lumière laser.

Les scanners laser sont très populaires et se déclinent en de nombreux modèles. Ils comprennent des unités portables, à bras, CMM basé, long portée, et un seul point de long gamme traqueurs. [6]

Chapitre III: Généralité sur scanner

III -2-3 Avantages de la 3D Laser Numériseurs

- Capable pour analyse difficile surface, tel comme brillant ou finitions sombres
- Moins sensible pour en changeant lumière conditions et ambient lumière
- Souvent plus portable
- Plus simple conception - Plus facile pour utiliser et inférieur coût



Figure III -1 Konica-Minolta Gamme 7 3D laser scanner



Figure III -2 Créaform HandySCAN portable 3D laser scanner

III -2-4 Projeté ou Structuré Lumière 3D Numériseurs

Historiquement connus sous le nom de scanners 3D à « lumière blanche », la plupart des scanners 3D à lumière structurée utilisent aujourd'hui une LED bleue ou blanche. lumière projetée. Ces scanners 3D projettent un motif lumineux composé de barres, de blocs ou d'autres formes sur un objet. Le scanner 3D possède un ou plusieurs capteurs qui regardent le bord de ces motifs ou formes de structure pour déterminer les objetsForme 3D. En utilisant la même méthode de triangulation trigonométrique que les scanners laser, la distance entre les capteurs et le lumière source est connu. Les scanners à lumière structurée peuvent être trépied monté ou la main détenu. [6]

III -2-5 Avantages de Structuré lumière 3D Numériseurs

- Très rapide analyse fois - comme aussi vite que 2 secondes par analyse

Chapitre III: Généralité sur scanner

- Grande numérisation zone – aussi grand que 48 pouces dans un seul analyse
- Haut résolution – comme haut comme 16 million points par analyse et 16 micron (.00062")
indiquer espacement
- Très haut précision - comme haut comme dix microns (.00039")
- Polyvalent – plusieurs lentilles scanner petit aux grandes pièces dans un seul système
- Portable - main détenu systèmes sont très portable
- Œil sans danger pour 3D balayage de humains et animaux
- Divers prix points de bas coût pour cher selon sur résolution et précision.[6]

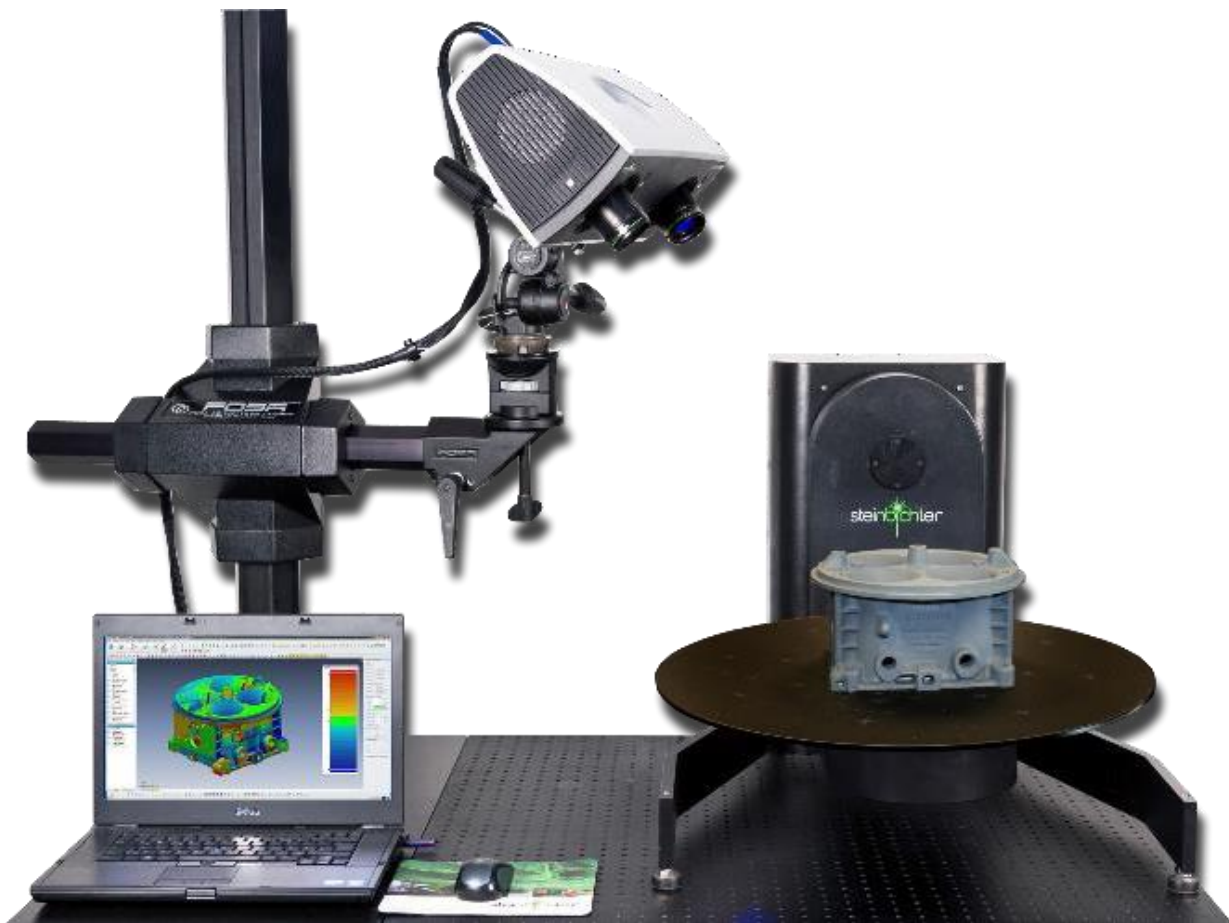


Figure III -3 Steinbichler Comète Structuré lumière Bleu DIRIGÉ 3D Scanner

Chapitre III: Généralité sur scanner

III -2-6 Moyen et Long Gamme 3D Numériseurs

Les scanners 3D longue portée sont disponibles en deux formats principaux - à base d'impulsions et à décalage de phase - qui sont tous deux bien adaptés pour objets volumineux tels que des bâtiments, des structures, des avions et des véhicules militaires. Les scanners 3D à déphasage fonctionnent également bien pour besoins de numérisation à moyenne portée tels que les automobiles, les grosses pompes et les équipements industriels. Ces scanners capturent des millions de points en tournant à 360 degrés tout en faisant tourner un miroir, le laser redirige vers l'extérieur vers l'objet ou les zones à être scanné en 3D.

III -2-7 Laser à base d'impulsions 3D scanners

Les scanners à impulsion laser, également connus sous le nom de scanners à temps de vol, sont basés sur un concept très simple : la vitesse de la lumière est connue très précisément. Ainsi, si le temps mis par un laser pour atteindre un objet et réfléchir retour à un capteur est connue, la distance entre le capteur et l'objet est connue. Ces systèmes utilisent des circuits précis à la picoseconde pour mesurer le temps nécessaire à des millions d'impulsions du laser pour revenir au capteur, et calcule une distance. En faisant tourner le laser et le capteur (généralement via un miroir), le scanner peut numériser jusqu'à un 360 degrés autour lui-même. [6]

III -2-8 Laser Déphasage 3D Numériseurs

Les systèmes de déphasage laser sont un autre type de technologie de scanner 3D à temps de vol et fonctionnent conceptuellement similaire aux systèmes à base d'impulsions. En plus de pulser le laser, ces systèmes modulent également la puissance du faisceau laser, et le scanner compare le phase de la laser envoyé dehors et retourné à la capteur.

La mesure du déphasage est généralement plus précise et plus silencieuse, mais n'est pas aussi flexible pour le balayage à longue portée en tant que scanners 3D basés sur des impulsions. Les scanners 3D basés sur des impulsions laser peuvent scanner des objets jusqu'à 1000 m de distance pendant la phase changement scanners sont mieux habillé pour balayage objets en haut pour 300m ou moins. [6]

III -2-9 Avantages Long Gamme 3D Numériseurs

- Numérisation 3D des millions de points dans un balayage unique – en haut pour 1 million points par deuxième
- Grande numérisation zone en haut pour 1000 mètres

Chapitre III: Généralité sur scanner

- Bien précision et résolution basé sur objet taille
- Sans contact avec sans encombre analyse tous les types de objets
- Portable

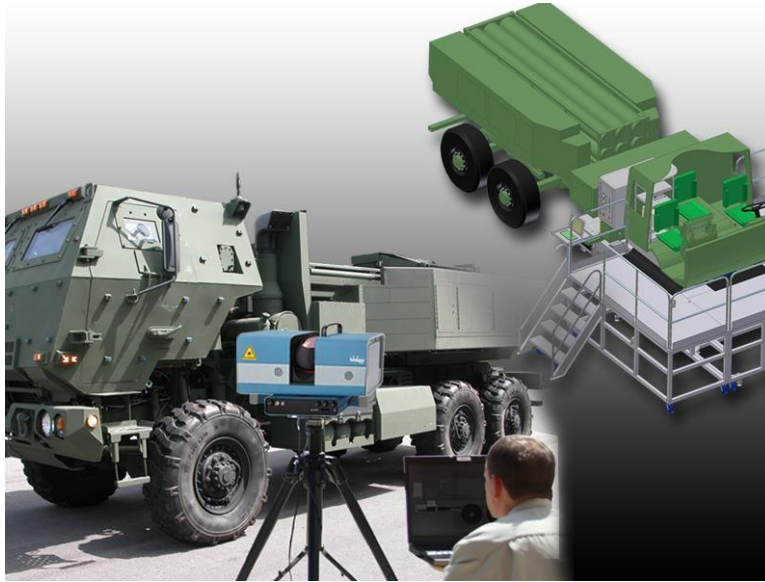


Figure III -4 Surphaseur Long Gamme 3D Scanner

III -2-10 Coordonner Mesure Machine (CMM)

Une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) est principalement utilisée pour inspecter les pièces. La machine peut être commandée manuellement ou grâce à un contrôle hors ligne via des logiciels et des ordinateurs. Les mesures sont définies en attachant une sonde au machine. La sonde a généralement une petite bille à l'extrémité d'un arbre d'un diamètre connu. Le CMM est alors programmé pour contact le partie. Quand le machine sens contact de la la pointe de la sonde un valeur de mesure dans pris dans XYZ espace.

Le type le plus courant de CMM est un type de pont qui a 3 axes X, Y et Z. Le système de sondage qui est attaché à de nombreux fois peut tourner en fournissant un supplémentaire 3 axes pour un total de 6 degrés de liberté (DOF).

Pour mesurer très précisément des pièces à quelques microns près, les MMT sont généralement déployées dans une salle d'inspection très contrôlée qui comprend un sol renforcé, une humidité et une

Chapitre III: Généralité sur scanner

température contrôlées, et une isolation contre les vibrations et autres forces qui pourraient affecter la précision. De plus, la plupart des MMT ont une grande surface de table en granit parfaitement plane. Les pièces sont fixées sur le table en granit de sorte qu'il n'y a pas de mouvement pendant le processus de mesure.

III -2-11 Avantages de MMT

- Un des la plupart précis façons de mesure un objet
- Petit pour grand les pièces peut être mesuré avec le approprié machine
- Industrie normes et certifications pour des mesures et logiciel exister
- Beaucoup modes et tailles de Machines exister depuis beaucoup fabrique [6].

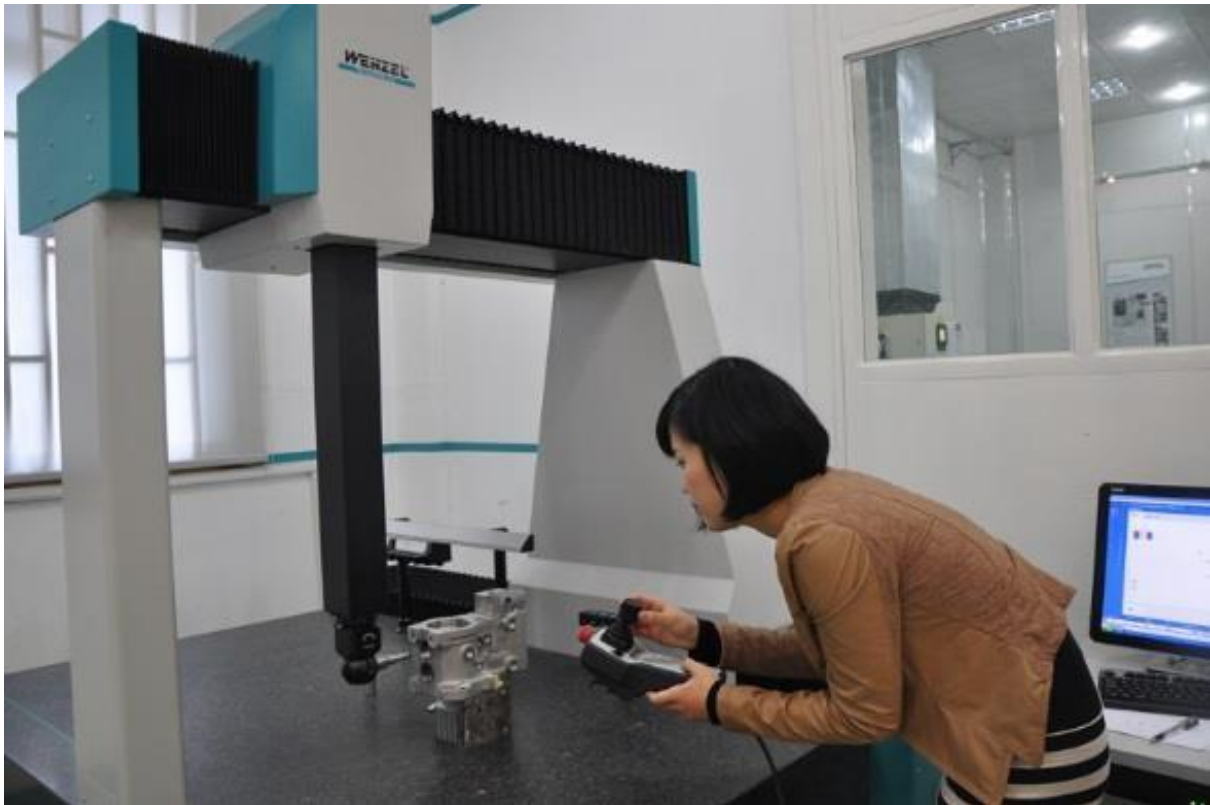


Figure III-5 MMT Wenzel

Chapitre III: Généralité sur scanner

III -2-12 Bras basé Numériseurs 3D et Sonde systèmes

Un système de balayage ou de palpage 3D armé est similaire à une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) dans le sens où il peut utiliser un palpeur pour mesurer une pièce. En plus de la sonde, de nombreux systèmes basés sur le bras ont également un 3D amovible scanner laser pour collecter une grande quantité de points. Le logiciel garde une trace des mouvements articulaires du bras pour savoir où c'est dedans 3D espace tout le temps.

Les systèmes à bras fonctionnent en fixant le bras articulé à une table ou à une base solide. Ensuite, le bras est tenu par un poignée à la fin et déplacée pour sonder ou scanner. Le principal avantage de ces systèmes est qu'ils sont beaucoup plus portable puis une CMM et peut être utilisé dans un boutique sol environnement. [6]

III -2-13 Avantages de Bras basé 3D Numériseurs et Sonde systèmes

- Portable système
- Bien précision sur petit pour taille moyenne les pièces
- Capacité sonder et analyse un seul partie



Figure III -6 Bras basé Scanner 3D et système de sondage

Chapitre III: Généralité sur scanner

III -2-14 Optiquement suivi 3D Numériseurs et Sonde Systèmes

Les systèmes de balayage et de sondage 3D à suivi optique utilisent un ensemble de caméras pour suivre l'emplacement de la tête de balayage 3D ou sonde dans l'espace 3D. Ces systèmes offrent des avantages par rapport aux systèmes basés sur le bras, notamment la liberté de mouvement, une meilleure précision sur la distance et possibilité d'inclure un « référencement dynamique ». Les systèmes de référencement dynamique fonctionnent par fixer des cibles ou des lumières LED à l'objet que vous numérisez ou sondez. Cela permet au système de caméra de suivre la pièce et la tête de balayage ou de sonde séparément l'une de l'autre. Le résultat net est que la pièce peut bouger même pendant la numérisation et aucune perte de précision ou de qualité des données ne se produit. De plus, le système de caméra peut également être déplacé, ce qui vous permet de analyser grand pièces en un installation. [6]

III -2-15 Avantages de optiquement suivi 3D balayage et sondage systèmes

- 3D balayage et sondage dans le même système
- Liberté de mouvement
- Grand 3D balayage volume
- Capacité pour sonde et analyse même tandis que le partie est en mouvement avec Non perte de précision
- Très portable

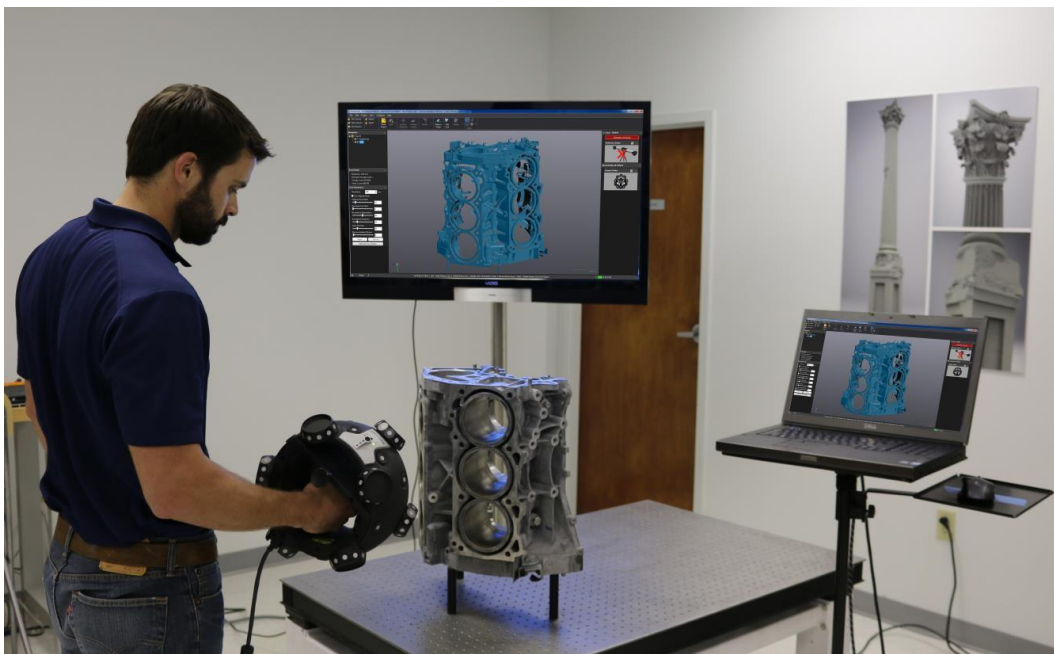


Figure III -7 Créaform MetraSCAN optiquement suivi 3D balayage et sondage système

III -5 Scanner 3D vs MMT (machine à mesurer tridimensionnelle) [07]

Le terme MMT signifie machine de mesure tridimensionnelle. Ce type d'appareil utilise une sonde – soit à contact de surface physique, soit à laser ou lumière optique – pour mesurer la géométrie d'un objet. Les MMT peuvent être opérées manuellement ou être contrôlées numériquement par ordinateur. Ces machines sont hautement précises, mais sont relativement lentes à saisir les données et n'acquièrent qu'un nombre limité de points. Une MMT standard ne capture que quelques centaines de points, par opposition aux scanners 3D qui capturent des millions des points.

Ainsi, les MMT sont aujourd'hui surtout utilisées pour l'inspection ciblée de parties de pièces plutôt que pour fournir des modèles 3D d'une pièce complète, auquel cas les scanners 3D sont la meilleure option.

Les principaux avantages des scanners 3D par rapport aux machines à mesurer tridimensionnelle (MMT) sont :

- ✓ **Rapidité** : Un scan 3D peut être réalisé et traité en quelques minutes, tandis que les MMT requièrent plus de temps.
- ✓ **Automatisation** : Les systèmes de scan sont plus aptes à être intégrés dans des environnements industriels comme les chaînes de production.
- ✓ **Portée** : Les scanners 3D capturent infiniment plus d'informations. Ils permettent aux ingénieurs et designers de comprendre la cause première d'une déformation, plutôt que de simplement détecter cette dernière. Les scanners peuvent également numériser des pièces beaucoup plus grandes, les MMT étant cantonnées à leur châssis fixe.
- ✓ **Flexibilité** : Il est plus facile de transporter et déplacer un scanner 3D à différents postes de travail pour l'adapter aux différents besoins sur la chaîne de production. Les MMT, machines souvent lourdes et encombrantes, doivent généralement rester installées au même endroit.
- ✓ **Non intrusif** : Bien que les MMT ne doivent pas toutes obligatoirement toucher les pièces physiquement, elles s'en approchent tout de même à quelques nanomètres, ce qui peut parfois poser problème. Un scanner 3D peut capturer les objets tout en restant relativement éloigné.

Chapitre III: Généralité sur scanner

✓ **Prix** : Les solutions de scan 3D pour métrologie sont généralement beaucoup plus accessibles que les machines à mesurer tridimensionnelles.

Tout cela étant dit, les MMT et les scanners 3D peuvent être complémentaires. Les MMT sont difficiles à égaler lorsqu'il s'agit de numériser des détails complexes ou des trous.

En utilisant à la fois une MMT (portable, par exemple) et un scanner 3D, il est possible d'atteindre un niveau de précision très élevé.

Chapitre IV

L'impression 3D dans le domaine médical

IV .1- Définition

L'impression 3D, terme généralement employé comme synonyme de fabrication additive, désigne une fabrication d'objets par dépôt d'un matériau au moyen d'une tête d'impression, d'une buse ou d'une autre technologie d'impression. Selon la norme ISO/ASTM 52900:2015 la fabrication additive est « un procédé consistant à assembler des matériaux pour fabriquer des pièces à partir de données de modèles en 3D, en général couche après couche, à l'inverse des méthodes de fabrication soustractive et de fabrication mise en forme ».

Le premier dépôt de brevet d'une technique d'impression 3D date de 1984 par une équipe de chercheurs français pour le compte de la société de lasers Cilas Alcatel. La même année, l'américain Charles W. Hull déposa sa demande de brevet pour la stéréolithographie, qu'il obtiendra finalement en 1986. En 1988 ce dernier commercialise la première imprimante 3D, la SLA-250 fondée sur cette technique d'impression. C'est le début de l'impression 3D, bien que ce terme n'ait été employé qu'à partir des années 90.

Initialement, l'impression 3D était réservée au prototypage rapide, permettant une fabrication rapide d'une pièce en petites séries à moindre coût. Elle s'est ensuite développée comme mode de production à part entière dans différents secteurs. Face aux besoins grandissants, de nouvelles techniques d'impression ont vu le jour afin d'élargir les possibilités en termes de matériaux employables, d'améliorer la qualité des objets fabriqués et d'augmenter la rapidité d'impression.

Quelle que soit la technique d'impression utilisée, les grandes étapes du processus d'impression pour l'obtention du produit final restent identiques

IV .2- L'impression 3D : une nouvelle technologie en santé

L'impression 3D connaît un véritable essor dans le champ de la santé. Cette technologie prometteuse permet de fabriquer différents objets à destination du monde médical : des maquettes d'éléments du corps humain pour préparer les interventions chirurgicales, des prothèses implantables ou non, et même des échantillons de tissus et d'organes [08].

IV .3- Le principe de l'impression en trois dimensions (3D)

L'impression tridimensionnelle est un procédé de fabrication additive, c'est -à-dire par ajout de matière et non par soustraction comme la plupart des techniques traditionnelles de fabrication (fraisage, tournage, rabotage, mortaisage, découpe...).

L'imprimante ajoute couche après couche des matériaux jusqu'à former un objet en trois dimensions, contrairement à l'usinage d'une pièce qui repose sur l'élimination de matière pour donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil [08].

IV .4- Les avantages de l'impression 3D dans le secteur médical

Le domaine médical est un secteur où les contraintes sont nombreuses et en évolution continu avec les nouveaux développements technologiques. Les ressources utilisées en chirurgie ou pour soigner les patients doivent être très précises et personnalisées. Ce qui fait en sorte que les pièces exigées sont limitées et par le fait même, très coûteuses. L'impression 3D est une solution de plus en plus envisagée et qui apporte beaucoup au futur de la santé et permet des soins adaptés à chaque patient.

IV.5- Les applications médicales

Un des avantages indéniables de l'impression 3D dans le secteur médical est sans contredit la possibilité de produire des pièces uniques et personnalisées à faible cout.

IV.6- L'impression 3D est fréquemment utilisée dans ces domaines :

- **Prothèses** : Plusieurs types de prothèses peuvent être fabriquées grâce à la l'impression 3D. Elle permet ainsi de proposer des modèles plus esthétiques et beaucoup moins chers.
- **Implants** : Les technologies médicales traditionnelles pour la fabrication d'implants demandent de respecter des contraintes très précises et couteuses. Avec l'impression 3D, il est désormais beaucoup plus facile d'améliorer la forme et les matériaux.
- **Domaine dentaire** : Saviez-vous que le domaine dentaire utilise fréquemment la technologie 3D ? Effectivement, les denturologistes et les orthodontistes peuvent imprimer plusieurs pièces à partir d'une numérisation 3D.
- **Greffes** : L'impression 3D révolutionne également les greffes ! Il est maintenant possible d'imprimer du cartilage et des os avec des matériaux biocompatibles et ainsi éviter le risque de rejet.
- **Ultrason** : Cette technologie a même été utilisée pour créer un modèle 3D de l'ultrason d'un bébé encore dans le ventre de sa mère ! Une patiente non-voyante a pu toucher le visage de son bébé grâce à ce procédé.
- **Médicaments** : Peut-être même qu'un jour certains médicaments pourront être imprimés à partir de la maison grâce à l'impression 3D !
- **Cœur artificiel** : Des chercheurs de Zurich ont réussi à créer un cœur artificiel souple en silicone. Ce cœur a les mêmes fonctions qu'un cœur humain ! Il n'est pas encore possible de transplanter ce cœur artificiel, mais

il est très utile pour étudier la possibilité de trouver d'autres solutions aux transplantations.

- **Victimes de brûlure** : Un médecin américain a créé une imprimante 3D qui imprime une greffe de peau directement sur les blessures !

IV .7- Modélisation de l'objet

L'objet à imprimer est modélisé en trois dimensions grâce un outil de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) (CATIA, SolidWorks, ProEngineer par exemple). Le fichier 3D obtenu est envoyé vers un logiciel spécifique (appelé « slicer ») qui le découpe en tranches et l'envoie à l'imprimante qui dépose ou solidifie la matière couche par couche pour obtenir la pièce finale.

A la place de l'encre, l'impression 3D utilise différents matériaux (plastiques, résines polymères, céramiques, métaux, voire des encres cellulaires).

Il existe plusieurs techniques d'impression 3D qui comportent chacune de nombreuses différences quant aux équipements, aux matériaux et aux résultats.

Les procédés d'impression sont classés en trois grandes familles :

- Les techniques fonctionnant par dépôt de matière fondue,
- Les techniques basées sur la photo polymérisation (un matériau liquide est solidifié grâce à la lumière),
- Les techniques fonctionnant par liage de poudre (un liant vient encoller des particules).

IV .8- Principaux procédés de fabrication [08]

IV .8.1- Impression 3D par Dépôt de Matière Fondue ou Fused Déposition Modeling (FDM) (1), (2).

IV .8.1.1- Principe

Cette technique consiste à déposer couche par couche un fil de matière thermoplastique (ou de métal) fondu à 185°C, à travers une buse d'extrusion chauffée pour créer une pièce. Un fil de matière, de l'ordre de 0,1 millimètre de diamètre, est alors extrudé sur une plateforme à travers la buse se déplaçant sur 3 axes (x, y et z). La plateforme descend d'un niveau à chaque nouvelle couche appliquée, jusqu'à impression de l'objet (Figure IV.1).

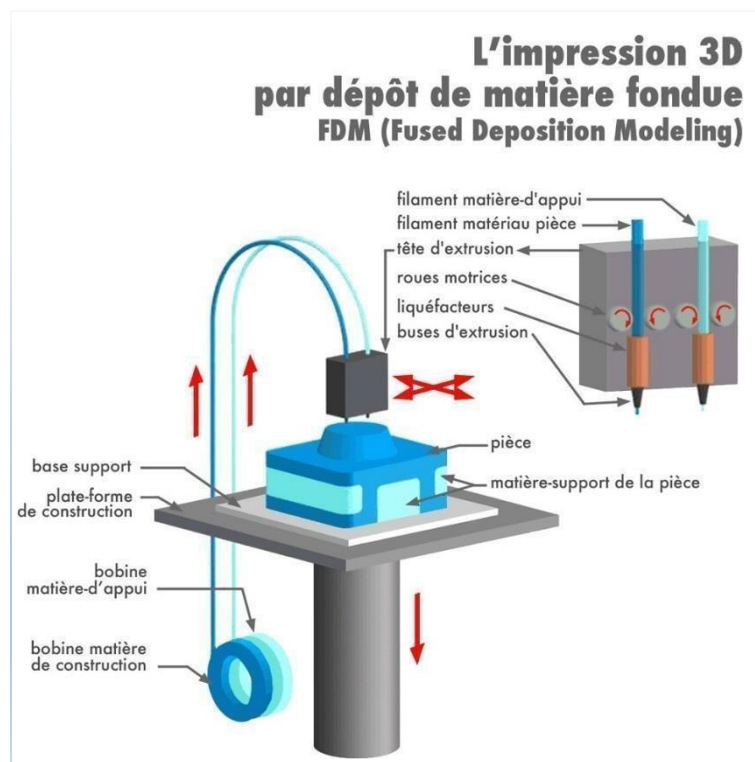


Figure IV 1 : Impression par Dépôt de Matière Fondue (1). Cette technique fonctionne par dépôts successifs d'un filament de plastique ou de métal. Une buse d'extrusion vient déposer la matière chauffée à plus de 185°C en couches très fines (0,04 mm en moyenne) au fur et à mesure de l'impression.

IV .8.1.2- Matériaux compatibles

Cette technologie est compatible avec un large choix de polymères thermoplastiques (Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS), Polycarbonate, Polyphénol Sulfone (PPSF), et Polyéther imide (PEI) (ex : ULTEM)). Il est aussi possible d'imprimer de la céramique en adaptant les têtes d'extrusion.

IV .8.2- Impression 3D par photo polymérisation

IV .8.2.1- Impression 3D par Stéréo lithographie ou StereoLithograph

Apparatus (SLA) (3), (4).

IV .8.2.1.1- Principe

Cette technique consiste à solidifier un liquide photosensible par le biais d'un rayon laser ultraviolet.

Une machine de stéréo lithographie est composée d'un réservoir rempli d'un liquide photopolymère, d'une plate-forme perforée mobile, d'un rayonnement ultraviolet (UV) et d'un ordinateur pilotant la plate-forme et le laser (Figure IV.2).

L'impression de la pièce est réalisée sur cette plate-forme horizontale, plongée dans un liquide plastique monomère. La photo-polymérisation du monomère est obtenue par un rayon de lumière ultra-violette contrôlé à l'aide de déflecteurs (axe x et y). Le faisceau laser balaie la surface de résine liquide selon le modèle 3D numérique transmis à l'imprimante. Une fois qu'une couche de matériau est solidifiée, la plate-forme descend de la valeur de l'épaisseur de la couche suivante et une nouvelle section est solidifiée. Le volume complet de la pièce est obtenu par autant de cycles que de couches nécessaires.

A la différence des autres techniques comme le Frittage Sélectif par Laser, le Dépôt de Matière Fondue ou l'impression 3D par PolyJet, un post-traitement au four est nécessaire pour finaliser la polymérisation et accroître au maximum la résistance du matériau. La pièce est ensuite nettoyée avec un solvant.

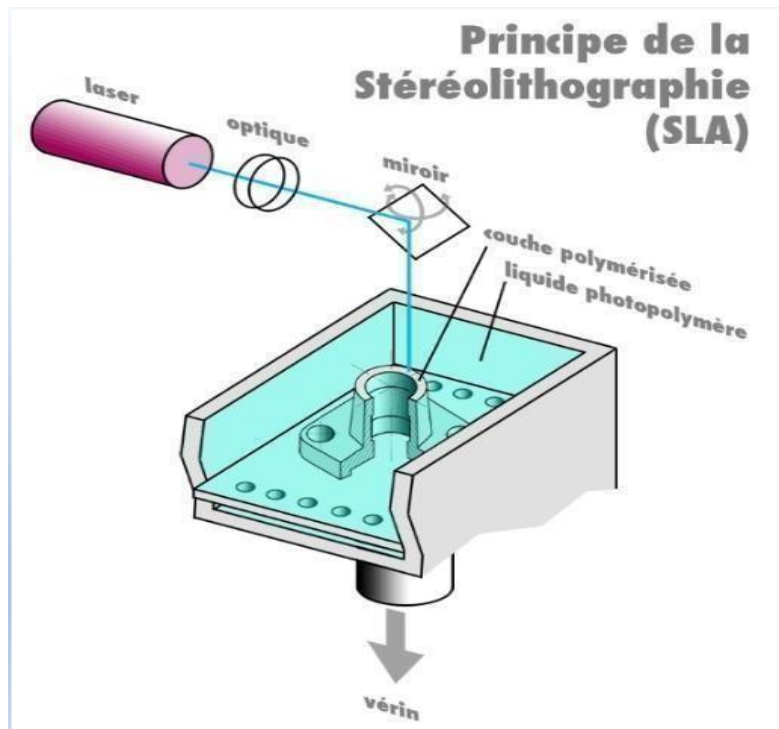


Figure IV. 2 : Impression 3D par stéréolithographie (3) (4). Le faisceau laser balaie la surface de résine liquide en fonction du modèle 3D numérique transmis à l'imprimante. Une fois qu'une couche de matériau est solidifiée, la plate-forme descend de la valeur de l'épaisseur de la couche suivante et une nouvelle section est solidifiée.

IV .8.2.1.2- Matériaux compatibles

Ce procédé utilise le principe de photo-polymérisation pour fabriquer des modèles, en résines acrylates ou époxydes et en ABS, de toute tailles et de géométries complexes avec une grande précision.

IV .8.2.2- Impression 3D par traitement numérique de la lumière ou DLP (Digital Light Processing) (5)

IV .8.2.2.1- Principe

Le principe est similaire à la SLA : la lumière est utilisée pour solidifier un polymère liquide. Une puce composée d'une matrice de miroirs orientables (jusqu'à plusieurs millions) réfléchit une lumière UV et projette une image correspondant à la forme de la couche à imprimer. Cette lumière vient donc frapper le polymère liquide qui se trouve dans un bac pour le solidifier. L'élément est extrait de la résine vers le haut pour créer la couche suivante dans le fond du réservoir avec la résine non traitée ou en tirant vers le bas l'objet en cours d'impression afin de traiter la résine se trouvant dans la partie supérieure de la cuve (Figure IV.3).

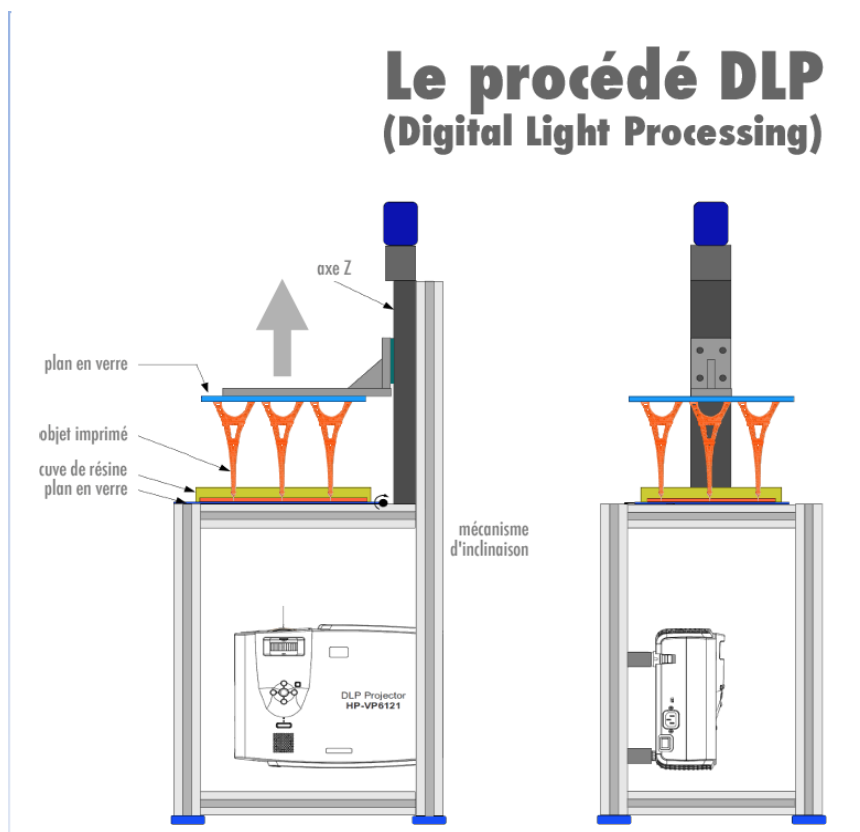


Figure IV.3 : Impression 3D par procédé DLP (5). Une puce composée d'une matrice de miroirs orientables (jusqu'à plusieurs millions) réfléchit une lumière UV et projette une image correspondant à la forme de la couche à imprimer. Cette lumière vient donc frapper le polymère liquide qui se trouve

dans un bac pour le solidifier. L'élément est extrait de la résine vers le haut pour créer la couche suivante dans le fond du réservoir avec la résine non traitée ou en tirant vers le bas l'objet en cours d'impression afin de traiter la résine se trouvant dans la partie supérieure de la cuve.

IV .8.2.2- Matériaux compatibles

Les matériaux utilisés par la DLP sont variés, avec une résine de base aux performances proches de l'ABS. D'autres matériaux ont été développés comme la résine claire ou les cires de moulage.

IV .8.2.3- Impression 3D par PolyJet ou et MultiJet (6)

IV .8.2.3.1- Principe

L'impression 3D par PolyJet ou Multijet combine la technologie d'impression par jet d'encre et l'utilisation de photopolymères (matériaux durcissant au contact de la lumière ultraviolette).

Les têtes d'impression (au nombre de 8 sur le schéma ci-contre (Figure IV.4)) projettent des microgouttelettes de matière photosensible sur une plateforme. A chaque projection, une lampe UV attachée aux têtes d'impression solidifie le polymère. Ensuite, le plateau d'impression descend légèrement (de la hauteur d'une couche d'impression) et une nouvelle couche est ajoutée de la même façon. Ces étapes sont répétées, couche par couche, jusqu'à obtention de la pièce, laquelle ne nécessite aucune étape de finition (cuisson, lissage, ou polissage...). Pour des géométries complexes, un matériau de support (ex : un gel facile à enlever à la main ou à l'eau) est ajouté par une des têtes d'impression.

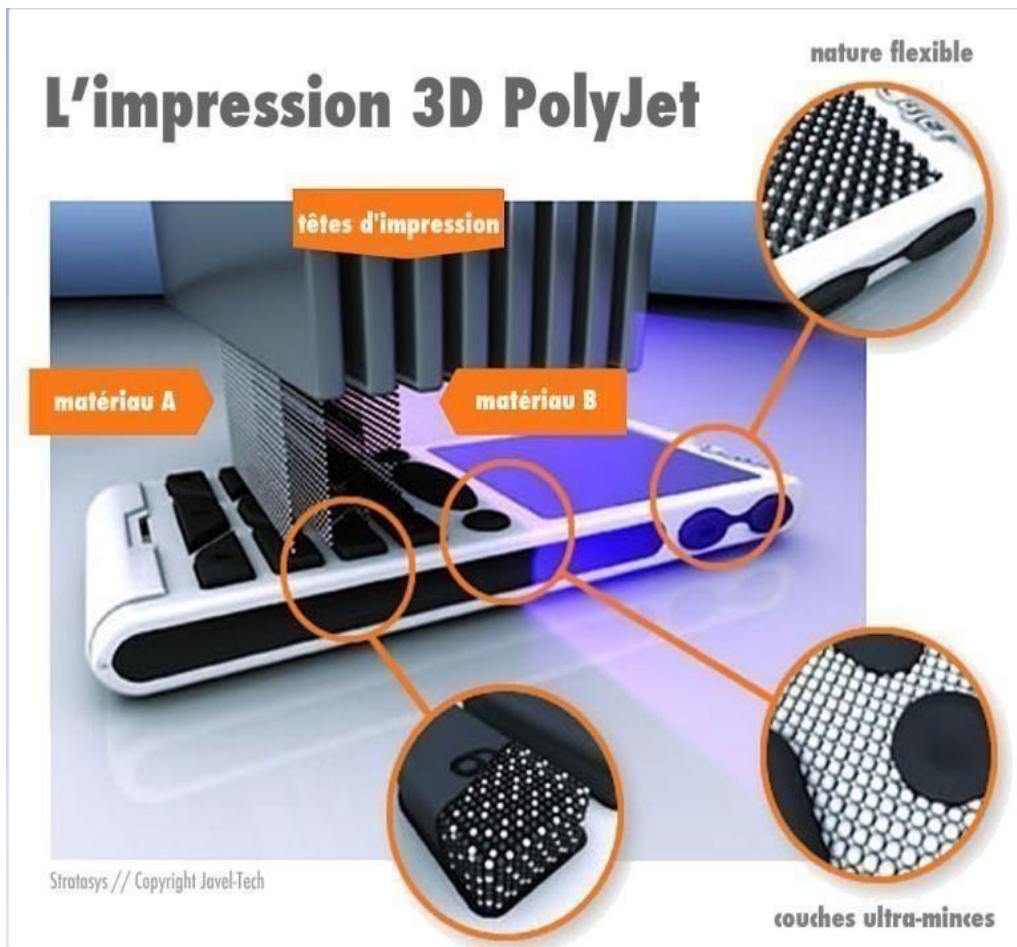


Figure IV.4 : Impression 3D par PolyJet (6). Les têtes d'impression (au nombre de 8) projettent des microgouttelettes de matière photosensible sur une plateforme. A chaque projection, une lampe UV attachée aux têtes d'impression solidifie le polymère. Ensuite, le plateau d'impression descend légèrement (de la hauteur d'une couche d'impression) et une nouvelle couche est ajoutée de la même façon. Ces étapes sont répétées, couche par couche, jusqu'à obtention de la pièce, laquelle ne nécessite aucune étape de finition (cuisson, lissage, ou polissage...). Pour des géométries complexes, un matériau de support (ex : un gel facile à enlever à la main ou à l'eau) est ajouté par une des têtes d'impression.

IV .8.2.3.2- Matériaux compatibles

Cette technologie est compatible avec une large gamme de matériaux et permet même d'en combiner plusieurs simultanément (chacun stocké dans des têtes d'impression distinctes). Elle permet d'obtenir des objets composés de plusieurs matériaux et de couleurs différentes.

IV .8.3- Impression 3D par liage de poudre

IV .8.3.1- Impression 3D par Frittage Sélectif par Laser ou Selective Laser Sintering (SLS) (7), (8)

IV .8.3.1.1- Principe

À l'instar de la SLA, le procédé SLS utilise un laser mais s'en différencie par la nature du matériau, qui n'est plus liquide, mais solide : poudre de plastique, de céramique, de verre ou de métal ; pour ce dernier, on parle de DMLS (Direct Metal Laser Sintering).

L'impression est réalisée couche par couche, à partir de poudres fusionnées, grâce à la température générée par un laser CO₂.

Un faisceau laser très puissant va fusionner une poudre (1mm d'épaisseur) à des points très précis définis (Figure IV. 5). Les particules de poudre sous l'effet de la chaleur vont alors fondre et finir par se fusionner entre elles. Une nouvelle couche de poudre fine est ensuite étalée et à nouveau durcie par le laser, puis reliée à la première. Cette opération est répétée plusieurs fois jusqu'à ce que la pièce soit finie. L'objet est brossé puis sablé ou poncé à la main pour les finitions.

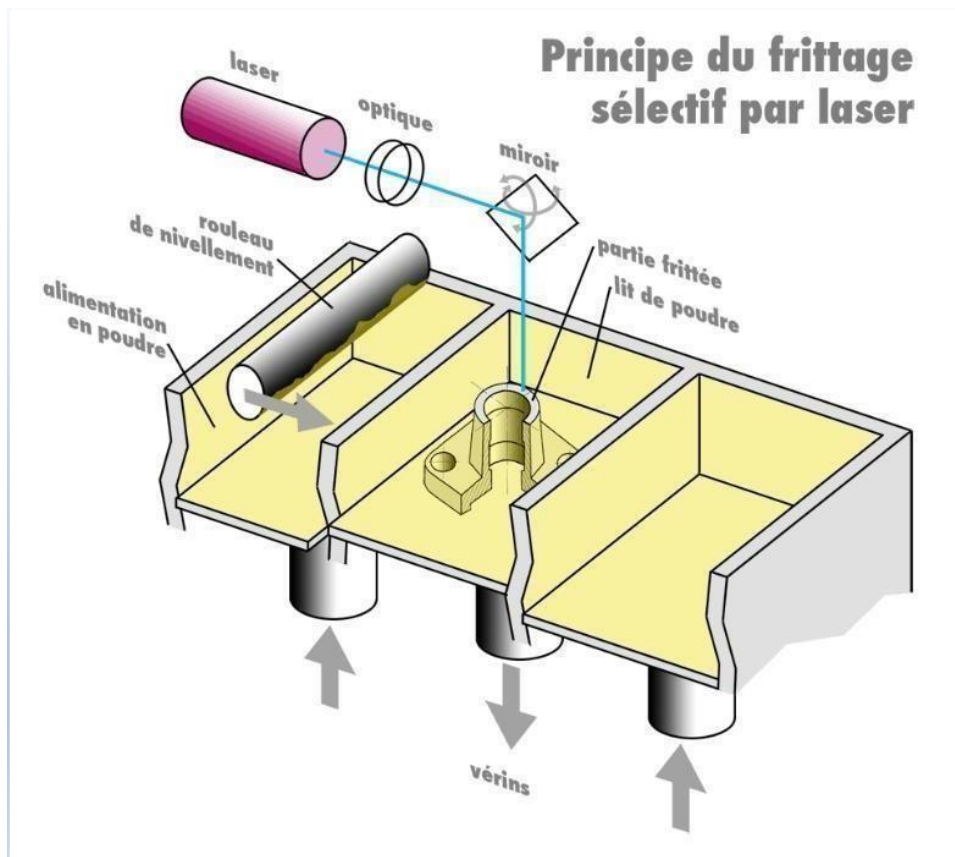


Figure IV.5 : Impression 3D par Frittage Sélectif par Laser (7). L'impression se fait couche par couche de poudres fusionnées grâce à la température générée par un laser CO₂. Un premier conteneur est rempli de poudre (à gauche) tandis que le conteneur de droite est vide. Le procédé commence par le dépôt d'une couche de l'ordre de 0,1 mm de poudre. Un rouleau passe sur la poudre et dépose une fine couche sur le conteneur de la pièce.

IV .8.3.1.2- Matériaux compatibles

La technique d'impression 3D par SLS utilise une large palette de poudres de métaux (acier, titane, aluminium...), de polymères plastiques (polyamide...), de fibres de verre, ou de verre.

IV .8.3.2- Impression 3D par Frittage Laser Direct de Métal ou Direct Metal Laser Sintering (DMLS) (9), (10)

IV .8.3.2.1- Principe

Ce procédé repose sur le même principe de fonctionnement que le Frittage Sélectif par Laser (SLS). La technologie DMLS n'utilise que de la poudre métallique (acier, cobalt-chrome, aluminium, titane ou alliages de métaux) contrairement au procédé SLS décrit précédemment (Figure IV. 6).

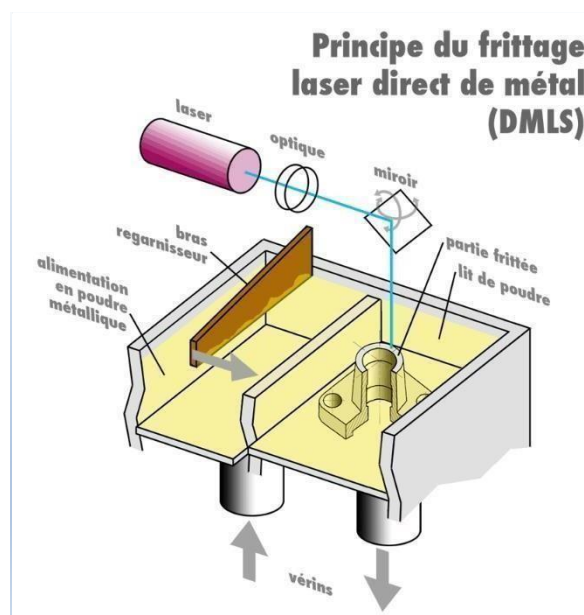


Figure IV. 6 : Impression 3D par frittage laser direct de métal (DMLS) (9). L'impression est réalisée couche par couche, à partir de poudres métalliques fusionnées, grâce à la température générée par un laser CO₂.

IV .8.3.2.2- Matériaux compatibles

Cette technologie permet la fabrication d'objets à partir de métaux (titane Ti6AlV4, acier inoxydable cobalt-chrome, et alliages) (Figure IV.7).



Figure IV.7 : Appareillages dentaires issus de la technologie SLS (11). Des prothèses dentaires sont réalisées grâce au procédé d'impression 3D par Frittage Laser Direct de Métal.

IV .8.3.3- Impression 3D par fusion de faisceau d'électrons ou Electron Beam Melting (EBM) (12)

IV .8.3.3.1- Principe

L'impression est réalisée à partir d'une poudre de métal, fondue par un laser à électrons dans une chambre à vide, à une température comprise entre 700 et 1 000 °C. Les électrons, projetés à très grande vitesse à travers un faisceau étroit, permettent de faire fondre et de fusionner les particules de métal aux endroits souhaités, couche après couche pour obtenir la pièce entière (Figure IV.8).

La principale différence avec les procédés laser est la source d'énergie qui n'est pas un faisceau laser mais un faisceau d'électrons. Lorsqu'un filament de tungstène est chauffé sous vide, il libère des électrons. Ces particules sont accélérées et dirigées par des électroaimants afin d'être projetées à grande vitesse sur la surface de la poudre. Ce phénomène permet de chauffer et de fusionner les particules de poudre.

La pièce obtenue nécessite un traitement post fabrication avec le retrait des supports de fabrication et les finitions par usinage des surfaces en contact avec d'autres pièces, ou polissage. Dans certains cas, il peut être nécessaire de la chauffer dans un four pendant plusieurs heures afin de libérer les contraintes induites par la fabrication.

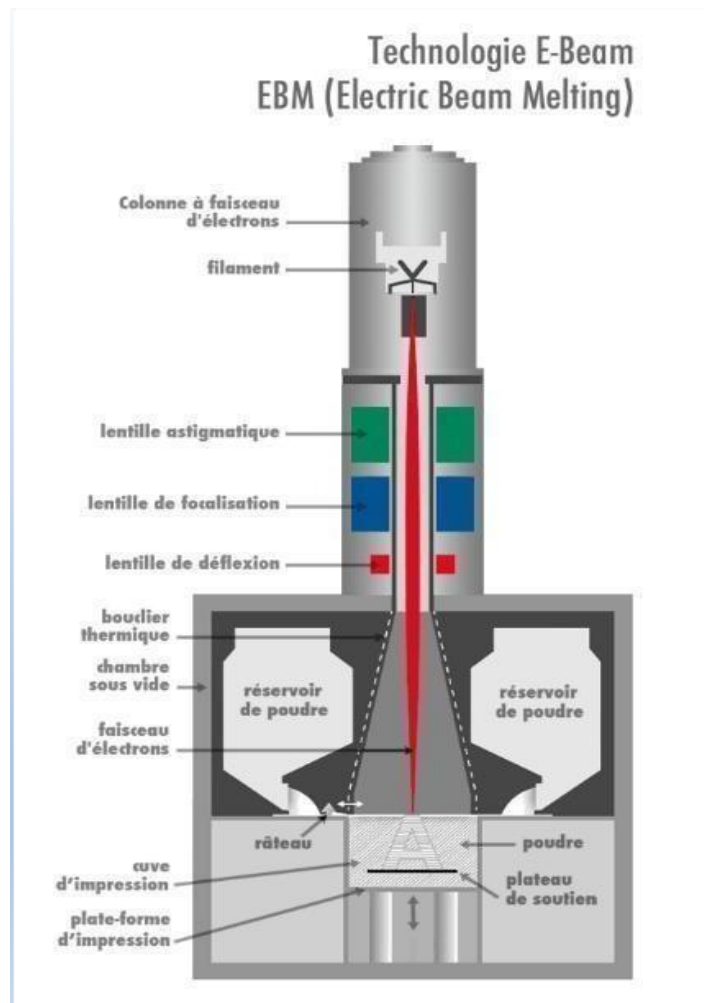


Figure IV. 8 : Impression 3D par fusion de faisceau d'électrons ou Electron Beam Melting (EBM) (12).L'impression est réalisée à partir d'une poudre de métal, fondue par un laser à électrons dans une chambre à vide, à une température comprise entre 700 et 1000°C. Les électrons, projetés à très grande vitesse à travers un faisceau étroit, permettent de faire fondre et de fusionner les particules de métal, couche après couche.

IV .8.3.3.2- Matériaux compatibles

Le procédé reposant sur des charges électriques, les matériaux utilisés doivent donc impérativement être conducteurs, comme les métaux. Sinon, aucune interaction ne peut se produire entre le faisceau d'électrons et la poudre. La fabrication de pièces en polymère ou en céramique est donc techniquement impossible avec un faisceau d'électrons.

Le procédé EDM permet de travailler une grande variété de métaux (titane, aluminium, nickel, acier inoxydable...) ou des alliages.

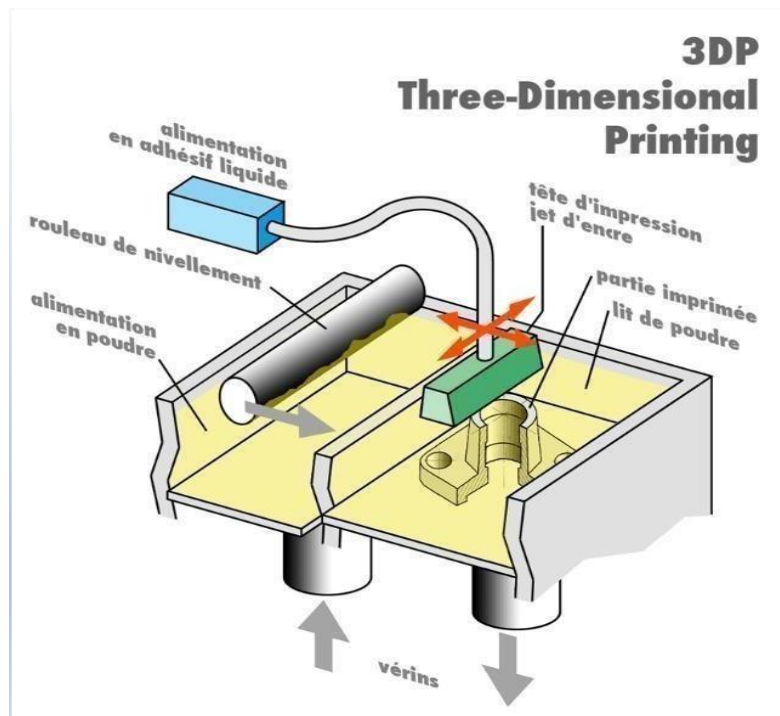
IV .8.3.4- Impression 3D par agglomération de poudre par collage (3DP) (13), (14)

IV .8.3.4.1- Principe

Un liant (ex : une colle) est projeté sur une poudre afin de la solidifier localement. Cette technologie permet la fabrication d'objets en couleurs avec différentes buses projetant des liants de couleurs différentes.

La machine possède deux pistons verticaux, l'un de fabrication et l'autre d'approvisionnement. Au début de l'impression d'une couche, le piston d'approvisionnement monte d'un cran, celui de fabrication descend d'un cran. Un rouleau vient ensuite transférer la poudre du bac d'approvisionnement vers le bac de fabrication, tout en la tassant. La tête d'impression peut ensuite déposer le liant localement afin de solidifier la poudre (Figure IV.9).

Le post-traitement est obligatoire. Après enlèvement de la poudre excédentaire par aspiration et jet d'air comprimé, la pièce doit être poncée et imprégnée d'une colle (type cyanoacrylate ou colle super glue) afin de garantir sa solidité.



FigureIV. 9 : Impression 3D par agglomération de poudre et collage (13). Une tête d'impression dépose de minuscules gouttes de glue qui viennent encoller le matériau en poudre. La coloration est obtenue en utilisant des glues teintées. Un traitement de finition est appliqué : la pièce imprimée est chauffée et la poudre excédentaire est éliminée.

IV .8.3.4.2- Matériaux compatibles

Cette technologie permet d'utiliser des métaux (acier inoxydable...), des polymères élastomères et des céramiques.

IV .9- Applications de l'impression 3D dans le domaine médical

L'impression 3D connaît un véritable essor dans le champ de la santé avec des applications possibles dans trois domaines principaux :

- Le prototypage rapide et la fabrication de dispositifs médicaux, d'implants, de prothèses, d'exosquelettes personnalisés,
- La réalisation de maquettes d'organes ou d'os à taille réelle pour l'entraînement des chirurgiens avant une opération,
- L'impression de tissus et d'organes biologiques, encore appelé « bio-impression ».

Les matériaux (métaux, plastiques, céramiques...) utilisés dans l'impression 3D sont choisis pour leur biocompatibilité et leurs propriétés fonctionnelles (résistance mécanique, porosité...).

L'impression 3D apporte un certain nombre d'avantages par rapport à des méthodes plus classiques de fabrication :

- La fabrication d'objets variés, complexes ou très petits (échelles macro et nano scopiques) avec une forte personnalisation, à bas coût, adaptables selon le patient ;
- La fabrication avec peu de déchets ;
- La production locale, à la demande, en volumes réduits, proche des lieux de consommation.

Cependant, il reste des limites à surmonter :

- La production non compétitive de grands volumes ;
- La variété encore limitée des matériaux utilisés pour les impressions ;
- L'impression complexe d'objets de grande taille ;
- La qualité et la durabilité limitées des objets imprimés.

IV .10- Conclusion

Historiquement, l'impression 3D a été développée pour la fabrication d'objets à partir de matériaux inertes (métaux, céramiques, plastiques...), permettant des réalisations sur-mesure, personnalisées ou d'objets complexes impossibles à obtenir avec les méthodes de fabrications classiques (usinage, fraisage, moulage...). Ainsi, de multiples applications existent d'ores et déjà pour le patient et pour le professionnel de santé : fabrication de prothèses, de dispositifs médicaux implantables et de médicaments, réalisation de maquettes destinées à préparer des interventions chirurgicales... le secteur de la santé a pu bénéficier de cette innovation et a parfaitement intégré cette technologie pour la production de pièce a intérêt médical.

Chapitre V
Numérisation et Impression 3D des pièces
à intérêt médical

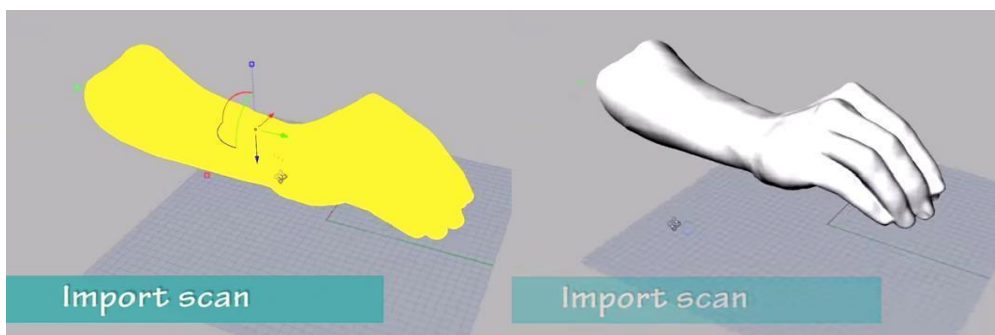
V.1- Numérisation et Impression 3D d'une orthèse du poignet sur mesure

Cette orthèse a pour but d'immobiliser un poignet suite à une fracture de l'EDR extra articulaire traitée conservativement et sans fractures associées. L'acquisition des images se fait par digitalisation. Le temps moyen est de 20-60s(56,61).La méthode est non-invasive et non douloureuse. La position du membre lors de la numérisation doit être identique à la position d'immobilisation dans l'orthèse, qui est déterminée par un médecin en fonction du type de fracture.



figureV .1-. digitalisation

Les mouvements involontaires doivent être minimisés pour ne pas interférer avec la qualité des images. La solution pour le patient non collaborant ou spastique est l'acquisition des images par digitalisation d'un moulage en plâtre fait sur le patient au par avant, ou l'utilisation d'un support de membre inspiré sur celui de Baronio2017. Une fois que la digitalisation est finie, les images seront transférées et modélées à l'ordinateur à travers du logiciel de CAO



figureV .2-.importation des images acquises par SCAN

V .1.1- Le traitement des données pour créer le modèle virtuel à l'aide d'un logiciel (CAO).

Durant la phase de modélisation il faut tenir compte de 3 aspects importants :

La variation de la densité selon la zone à immobiliser pour diminuer le poids et la quantité de matériel utilisé ; la création d'un design treillis pour améliorer la ventilation et la surveillance cutanée et pour finir l'arrondissement des bords pour éviter les points d'appuis. L'épaisseur de l'orthèse doit être choisie. Les auteurs proposent entre 3 à 4 mm (51,57) et sera variée entre les zones souhaitées moins denses et les zones souhaitées plus rigides.

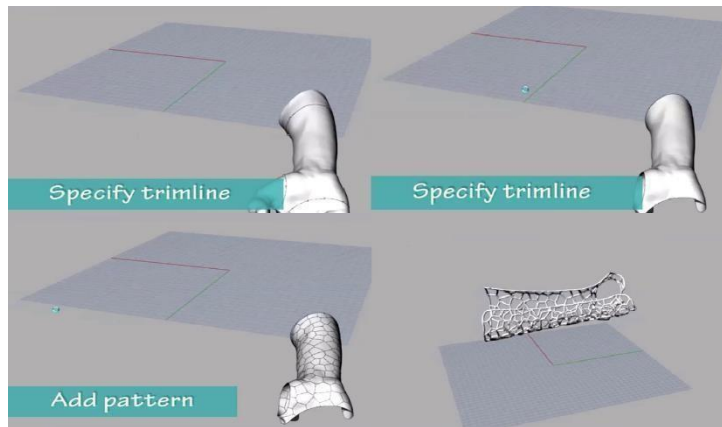


Figure V .3-.traitementdesimagesparCAO

Le modèle pour l'immobilisation de fracture de l'EDR sera, au contraire de celui de Thomas More, créé en forme tubulaire et en ensuite séparé pour former deux coquilles permettant ainsi le système d'ouverture de l'orthèse. Une fois que le modèle virtuel est prêt, le fichier doit être transformé en format **STL** de façon à pouvoir être lu par l'imprimante.

V .1.2- La réalisation de l'objet par un dispositif d'impression 3D

C'est la dernière phase de la fabrication, à l'exception des impressions 3D qui nécessitent une finition manuelle. Bien qu'il y ait différents types de technologie d'impression, celles déjà utilisées et documentées pour fabriquer des orthèses sont la SLA, le FDM, le SLS et PolyJet Parmi toutes les technologies disponibles capables de produire des pièces en plastique, la FDM représente le choix le plus approprié compte tenu à la fois des coûts et du temps de fabrication requis



FigureV 4-. Orthèse après l'impression format bivalve d'ouverture facile



FigureV .5-.système de rééducation et système d'ultrasons



FigureV 6. Orthèse de stabilisation post fracture EDR

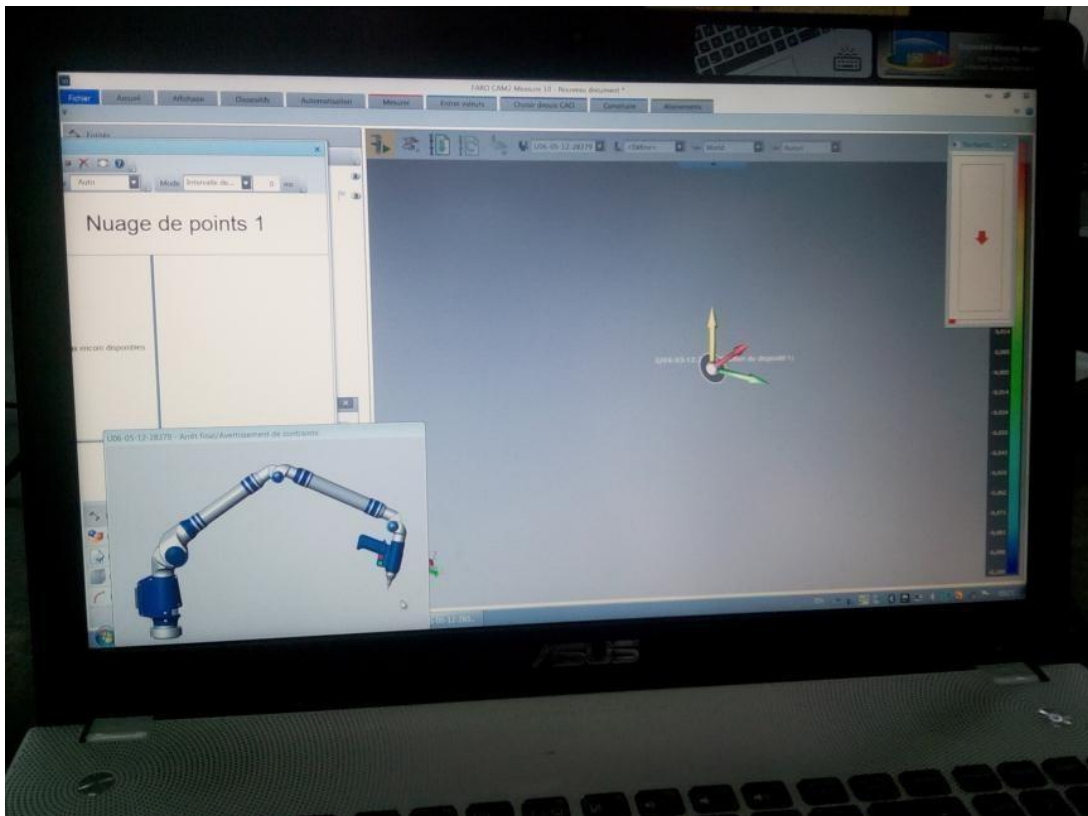
V.2- Numérisation 3D d'une prothèse amovible à l'aide de FARO :

- ✓ **étape 1** : Nettoyage de la prothèse avant de passer à la numérisation, il est à noter que cette opération nécessite un soin particulier pour ne pas endommager la surface de la pièce ;
- ✓ **étape 2** : Arrosage de la surface de la pièce par un produit liquide de type SHERWIN (Figure16), cette opération a pour but d'avoir une bonne réflexion des rayons laser vers le capteur de réception des données de l'appareil (scanner FARO).



FigureV 7- produit liquide de type SHERWIN

- ✓ **étape 3** : Cette étape est composée de deux parties, la première concernant le scanner FARO, sur ce on doit choisir un plan qui sert de référence pour démarrer l'opération de numérisation de la surface de la Prothèse La deuxième partie concerne le logiciel du scanner FARO (Figure17), Le plan choisi doit être valide pour avoir un fichier texte qui regroupe les données de l'acquisition sous forme de trois coordonnées x, y et z

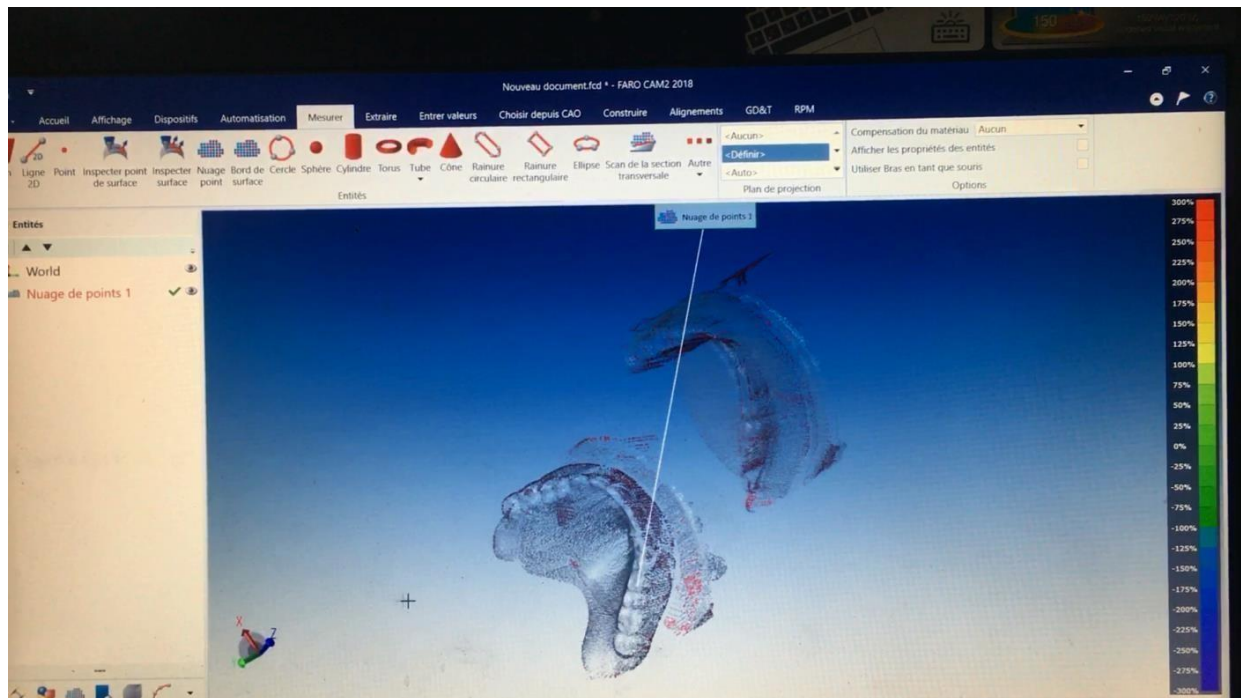


FigureV 8 - Le plan de logiciel de scanner.

- étape 4** : Scanne de la prothèse, l'opérateur qui manipule le scanner manuellement doit balayer toute la surface de la pièce (Figure18).



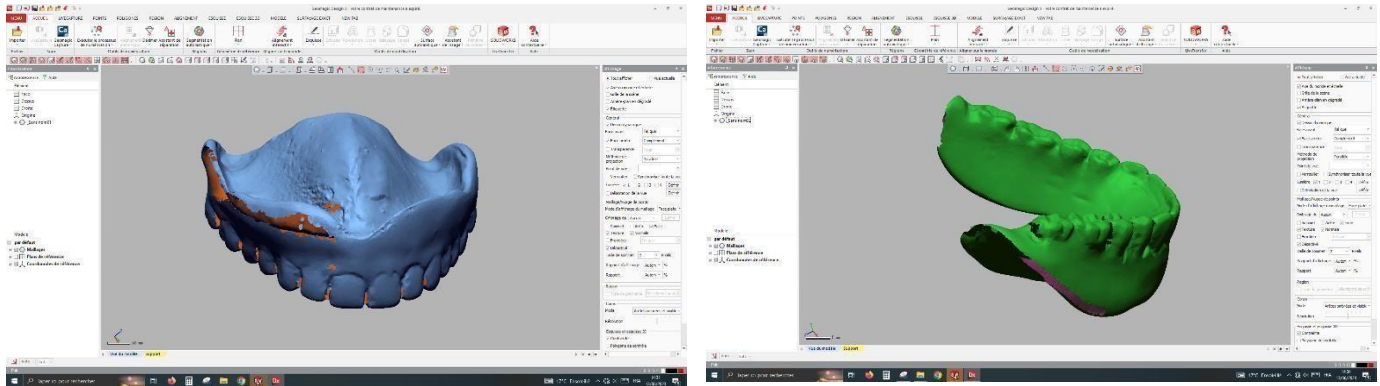
FigureV 9 - Scanne de la prothèse



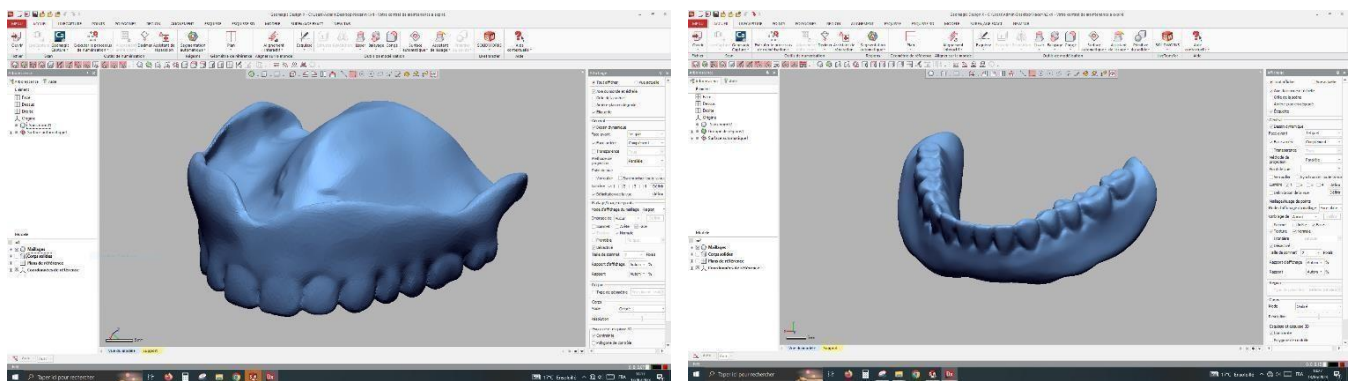
FigureV 10- le nuage de point

V.3- Traitement des données

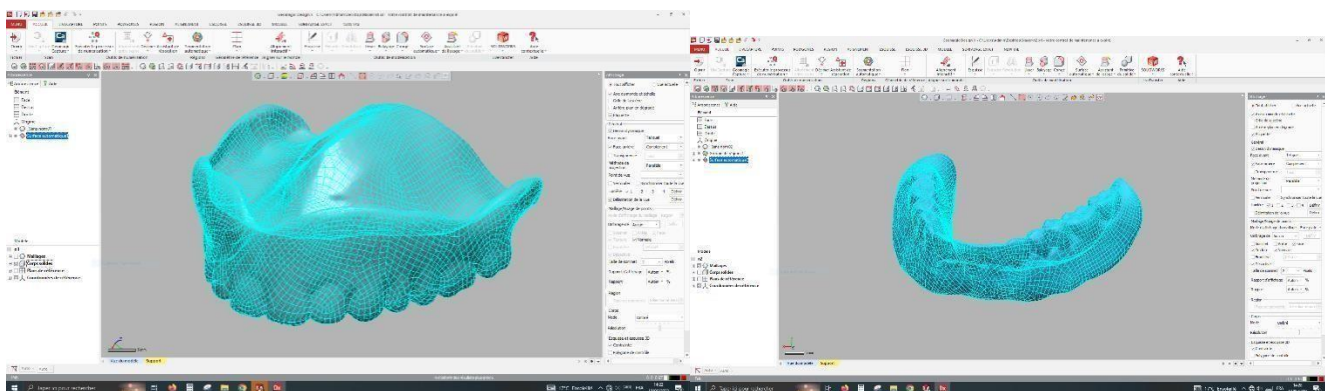
Nous utiliserons le logiciel geomagic Design X



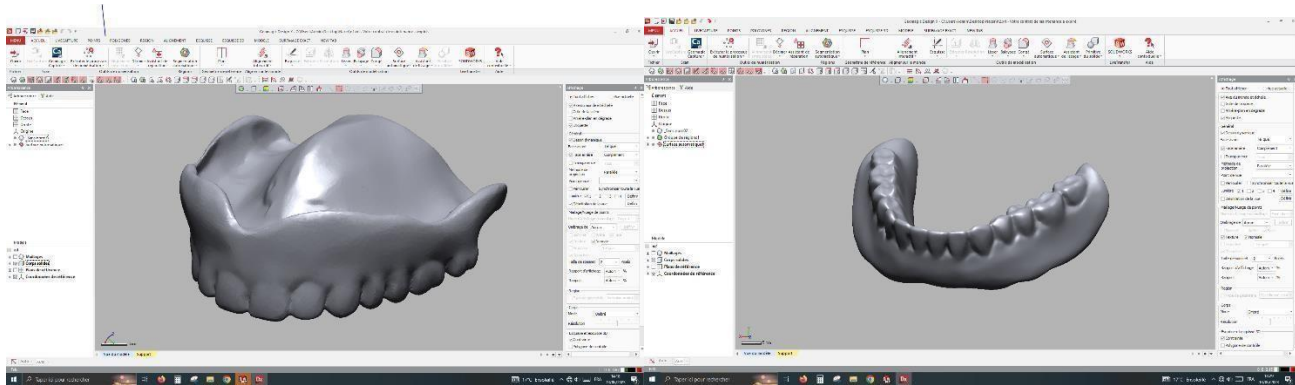
FigureV 11 - Corps Scanné mailé format STL avant préparation



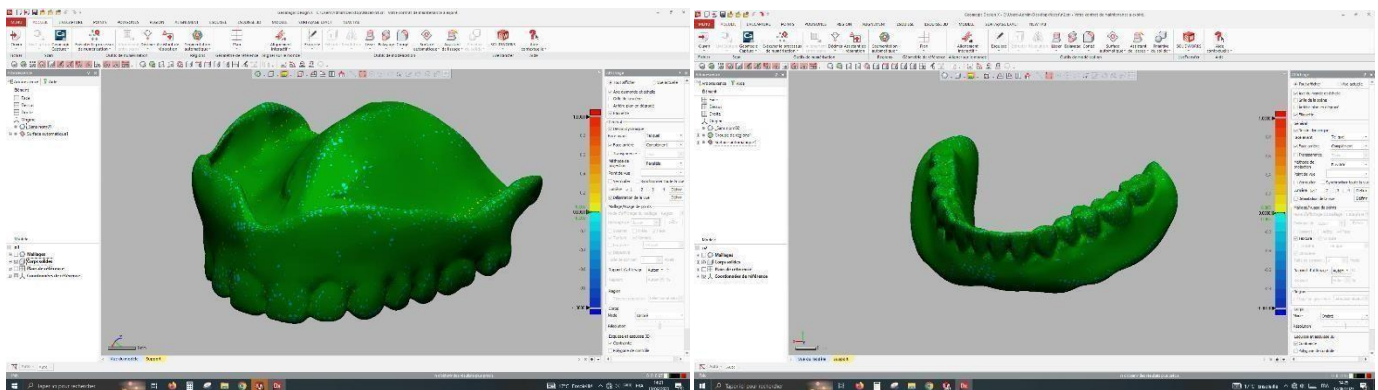
FigureV 12 - Corps préparé



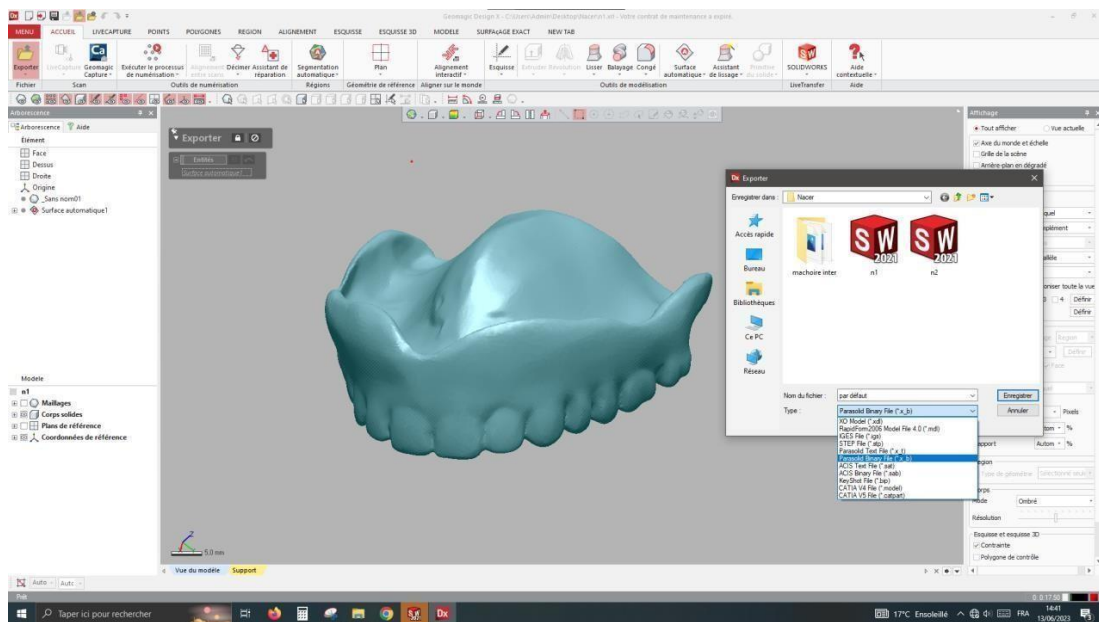
FigureV 13 -Création des courbes pour construire le corps surfacique



FigureV 41 -Model 3D final



FigureV 14 -Comparaison (contrôle de déviation) entre le corps scanné et le modèle 3D finale



FigureV 15 - Export de fichier pour l'impression 3D

Conclusion général

Cette thèse porte sur l'étude et la réalisation d'une pièce d'intérêt médical par rétro conception. À partir de l'analyse des résultats, nous pouvons tirer les conclusions principales suivantes :

- 1- La rétro conception est la technologie la plus adaptée pour répondre aux besoins des professionnels de la santé en matière de soins personnalisés sur mesure.
- 2- L'amélioration de l'ajustement et de la durabilité des prothèses résulte des avancées dans la numérisation et l'impression 3D.
- 3- La rétro conception offre des solutions aux prothésistes, garantissant une précision et une finesse lors de la conception de pièces d'intérêt médical.
- 4- Une conception rigoureuse et maîtrisée de la part du praticien est essentielle pour la réussite d'une prothèse.
- 5- Une prothèse inadaptée peut causer des douleurs, un inconfort, une esthétique médiocre et être peu ou pas portée par le patient.

Il convient de souligner que la fabrication des pièces scannées dans notre cas nécessite des ressources importantes, qui ne sont actuellement pas disponibles dans notre université. Nous espérons que cette étude encouragera notre faculté à investir dans ces ressources, afin que les futurs étudiants en master puissent entreprendre des projets similaires et réaliser ces pièces avec succès.

Références Bibliographique

[01]. Vinesh Raja and Kiran J. Fernandes (Eds.) Reverse Engineering An Industrial Perspective

[02] <http://cloud-forge.net/blog/retro-conception/>

[03] Mesures sans contact – Méthodes optiques J.-L. CHARRON – Techniques de l'ingénieur - Novembre 2007

[04]. UNISTRA / CNRS / IN2P3 / IPHC / Service de Mécanique,
marc.krauth@iphc.cnrs.fr

[04] [05]. Mansouri Mohamed amine (Conception d'un scanner 3D Pour la retro conception des pièces) Universitaire Yahia FARES de Médéa Département de Génie mécanique Filière : électromécanique Spécialité : mécatronique.

[06]. EMS-USA.COM 3D printind-3D scanning –product design.

Email: quotes@ems-usa.com www.ems-usa.com

[07]. <https://www.aniwaa.fr/guide-achat/scanners-3d/meilleur-scanner-3d-metrologie-inspection/>

[08]. MEMOIRE DU DIPLOME D'ETUDES SPECIALISEES DE PHARMACIE INDUSTRIELLE ET BIOMEDICALE PAR M. Thomas LE RESTE

Résumé

Dans cette thèse on a fait une étude de la rétro conception, et on a choisi une Pièce à intérêt médical.

L'objectif de ce mémoire est d'aider à la compréhension de la chaîne de fabrication de la prothèse au laboratoire (numérisation et impression 3D).

De nombreuses techniques et de multiples matériaux sont désormais accessibles aux prothésistes permettant la gestion de la quasi-totalité des cas cliniques.

Mots-clés : Rétro conception ; Pièce à intérêt médical ; Nuage de points ; Numeration; impression 3D.

ملخص

في هذه الأطروحة قمنا بدراسة الهندسة العكسية ، واخترنا جزءًا ذا أهمية طبية. الهدف من هذه الرسالة هو المساعدة في فهم سلسلة تصنيع الأطراف الاصطناعية في المختبر (المسح الضوئي والطباعة ثلاثية الأبعاد). (العديد من التقنيات والمواد المتعددة متاحة الآن لأخصائيي الأطراف الاصطناعية مما يسمح بإدارة جميع الحالات السريرية تقريبًا .
الكلمات الرئيسية: الهندسة العكسية. قطعة ذات فائدة طبية. سحابة من النقاط؛ النسخ. طباعة ثلاثية الأبعاد.

Summary

In this thesis, we made a study of reverse engineering, and we chose a part with medical interest.

The objective of this thesis is to help understand the manufacturing chain of the prosthesis in the laboratory (scanning and 3D printing).

Many techniques and multiple materials are now accessible to prosthetists allowing the management of almost all clinical cases.

Keywords: Reverse engineering; Piece of medical interest; a cloud of dots; Digitization; 3D printing.