



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

Creative commons : Paternité - Pas d'Utilisation Commerciale -
Pas de Modification 2.0 France (CC BY-NC-ND 2.0)



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr>

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD-LYON I
U.F.R. D'ODONTOLOGIE

Année 2016

THESE N° 2016 LYO 1D027

T H E S E
POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le : 07 Juillet 2016

par

CEYTE SAMUEL

Né le 04 Avril 1992, à Annonay (07)

**L'impression 3D, fonctionnement
et perspectives en chirurgie dentaire.**

JURY

- M. le Professeur Denis BOURGEOIS	Président
<u>- M. le Docteur Laurent VENET</u>	<u>Assesseur</u>
- M. le Docteur Jean-Pierre DUPREZ	Assesseur
- M. le Docteur Thomas FORTIN	Assesseur

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON I

Président de l'Université	M. le Professeur F. FLEURY
Président du Conseil Académique	M. le Professeur H. BEN HADID
Vice-Président du Conseil d'Administration	M. le Professeur D. REVEL
Vice-Président de la Commission Recherche du Conseil Académique	M. F. VALLEE
Vice-Président de la Commission Formation Vie Universitaire du Conseil Académique	M. le Professeur P. CHEVALIER

SECTEUR SANTE

Faculté de Médecine Lyon Est	Directeur : M. le Professeur. J. ETIENNE
Faculté de Médecine et Maïeutique Lyon-Sud Charles Mérieux	Directeur : Mme la Professeure C. BURILLON
Faculté d'Odontologie	Directeur : M. le Professeur D. BOURGEOIS
Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques	Directrice : Mme la Professeure C. VINCIGUERRA
Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation	Directeur : M. X. PERROT, Maître de Conférences
Département de Formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine	Directrice : Mme la Professeure A.M. SCHOTT

SECTEUR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Faculté des Sciences et Technologies	Directeur : M. F. DE MARCHI, Maître de Conférences
UFR des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives	Directeur : M. Y. VANPOULLE, Professeur Agrégé
Institut Universitaire de Technologie Lyon 1	Directeur : M. le Professeur C. VITON
Ecole Polytechnique Universitaire de l'Université Lyon 1	Directeur : M. E. PERRIN
Institut de Science Financière et d'Assurances	Directeur : M. N. LEBOISNE, Maître de Conférences
Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education (ESPE)	Directeur : M. le Professeur A. MOUGNIOTTE
Observatoire de Lyon	Directrice : Mme la Professeure I. DANIEL
Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique	Directeur : M. G. PIGNAULT

FACULTE D'ODONTOLOGIE DE LYON

Doyen :	M. Denis BOURGEOIS, Professeur des Universités
Vice-Doyen :	Mme Dominique SEUX, Professeure des Universités
Vice-Doyen :	M. Stéphane VIENNOT, Maître de Conférences
Vice-Doyen :	Mlle DARNE Juliette

SOUS-SECTION 56-01: **PEDODONTIE**

Professeur des Universités :	<u>M. Jean-Jacques MORRIER</u>
Maître de Conférences :	M. Jean-Pierre DUPREZ

SOUS-SECTION 56-02 : **ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE**

Maîtres de Conférences :	Mme Sarah GEBEILE-CHAUTY, <u>Mme Claire PERNIER</u> ,
--------------------------	---

SOUS-SECTION 56-03 : **PREVENTION - EPIDEMIOLOGIE ECONOMIE DE LA SANTE - ODONTOLOGIE LEGALE**

Professeur des Universités	M. Denis BOURGEOIS
Professeur des Universités Associé :	M. Juan Carlos LLODRA CALVO
Maître de Conférences	<u>M. Bruno COMTE</u>

SOUS-SECTION 57-01 : **PARODONTOLOGIE**

Maîtres de Conférences :	Mme Kerstin GRITSCH, <u>M. Philippe RODIER</u> ,
--------------------------	--

SOUS-SECTION 57-02 : **CHIRURGIE BUCCALE - PATHOLOGIE ET THERAPEUTIQUE ANESTHESIOLOGIE ET REANIMATION**

Maîtres de Conférences :	Mme Anne-Gaëlle CHAUX-BODARD, <u>M. Thomas FORTIN</u> , M. Jean-Pierre FUSARI, M. Arnaud LAFON
--------------------------	---

SOUS-SECTION 57-03 : **SCIENCES BIOLOGIQUES**

Professeur des Universités :	<u>M. J. Christophe FARGES</u>
Maîtres de Conférences :	Mme Béatrice RICHARD, Mme Béatrice THIVICHON-PRINCE, M. François VIRARD

SOUS-SECTION 58-01 : **ODONTOLOGIE CONSERVATRICE - ENDODONTIE**

Professeurs des Universités :	M. Pierre FARGE, <u>M. Jean-Christophe MAURIN</u> , Mme Dominique SEUX
Maîtres de Conférences :	Mme Marion LUCCHINI, M. Thierry SELLI, M. Cyril VILLAT

SOUS-SECTION 58-02 : **PROTHESE**

Professeurs des Universités :	M. Guillaume MALQUARTI, Mme Catherine MILLET
Maîtres de Conférences :	M. Christophe JEANNIN, M. Renaud NOHARET, <u>M. Gilbert VIGUIE</u> , M. Stéphane VIENNOT

SOUS-SECTION 58-03 : **SCIENCES ANATOMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES OCCLUSODONTIQUES, BIOMATERIAUX, BIOPHYSIQUE, RADIOLOGIE**

Professeurs des Universités :	Mme Brigitte GROSGOGEAT, <u>M. Olivier ROBIN</u>
Maîtres de Conférences :	M. Patrick EXBRAYAT, Mme Sophie VEYRE-GOULET

SECTION 87 : **SCIENCES BIOLOGIQUES FONDAMENTALES ET CLINIQUES**

Maître de Conférences

Mme Florence CARROUEL

A notre président de jury,

Mr le professeur **Denis BOURGEOIS**

Professeur des Universités à l'UFR d'Odontologie de Lyon

Praticien-Hospitalier

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université Lyon I

Docteur en Droit (3ème cycle)

Maître en Biologie Humaine

Odontologiste des Hôpitaux

Habilité à Diriger des Recherches

Doyen de l'UFR d'Odontologie

Nous vous remercions d'avoir accepté de présider notre thèse. Votre dynamisme et votre implication dans le développement de la faculté forcent le respect. Veuillez trouver dans ce travail le témoignage de notre gratitude pour vos enseignement et l'expression de notre plus sincère considération.

A notre Directeur de thèse,

Mr le docteur **Laurent VENET**

Assistant hospitalo-universitaire au CSERD de Lyon

Ancien Interne en Odontologie

Docteur en Chirurgie Dentaire

Nous vous remercions d'avoir accepté la direction de notre thèse. Nous vous exprimons notre plus grande reconnaissance pour votre soutien et votre gentillesse, tant lors de la rédaction de cette thèse que lors de nos vacations cliniques. Après avoir été là à notre toute première vacation, il y a une forme plaisante de cohérence à votre accompagnement lors de la clôture de notre cursus. Vous resterez pour nous un exemple tant pour vos compétences professionnelles que sur le plan personnel.

A notre juge,

Mr le docteur **Thomas FORTIN**

Maître de Conférences à l'UFR d'Odontologie de Lyon

Praticien-Hospitalier

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université Grenoble

Responsable de la sous-section Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique

Habilité à Diriger des Recherches

Nous vous remercions d'avoir accepté de siéger dans notre jury. Votre dynamisme, votre bonne humeur, votre gentillesse et votre disponibilité vis à vis des étudiants nous ont beaucoup aidés à mener à bien notre formation. Veuillez trouver dans cette thèse l'expression de notre profond respect et de nos remerciements les plus chaleureux.

A notre Juge,

Mr le docteur **Jean-Pierre DUPREZ**

Maître de Conférences à l'UFR d'Odontologie de Lyon

Praticien-Hospitalier

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Sciences Odontologiques

Habilité à Diriger des Recherches

Nous vous remercions d'avoir accepté de siéger parmi nos juges. Nous vous remercions pour votre bienveillance à l'égard des étudiants et n'oublierons jamais la qualité de vos enseignements. Que ce travail soit l'occasion de vous montrer notre profonde reconnaissance.

Remerciements :

La rédaction de cette thèse s'est déroulée avec un certain parfum boisé accompagnant toute aventure digne de ce nom. Les personnes ayant contribué à l'avancement de ce projet sont nombreuses et de différents horizons, je ne saurais les citer toutes, mais je vais essayer d'en oublier le moins possible :

A Laureline LELEU (prochainement CEYTE), merci d'avoir été là au quotidien depuis maintenant 5 ans passés, et d'avoir supporté mes humeurs changeantes et la thérapie freudienne que nous t'imposions occasionnellement avec mes amis.

A mes parents et ma sœur, toujours là en cas de besoin, là encore lors de la présentation de cette thèse, là encore à l'avenir. J'essaierai de vous rendre fier. Même chose pour mes grands parents qui ont largement contribué à rendre possible ces études.

A mes collègues et amis ayant contribué au bon déroulement de mon cursus: Marc pour son carburant tout droit importé des îles, Aurèle pour ses remarques qui font mouche à chaque fois, Fred pour sa générosité et sa bonté d'âme, Alex pour sa présence rassurante (body painting), Carole pour les nombreux souvenirs et événements partagés, Lynda pour sa bonne humeur permanente (quand elle est là) et les nombreux autres affreux. Mention spéciale à Antoine pour m'avoir légué ce sujet fort intéressant, avant de partir vers sa destination de rêve.

Au Dr Théo, sorte de papa mentor dont la thèse m'a énormément servie pour mettre en forme la mienne, du sommaire à la 4ème de couverture. Et les parties d'Halo Reach aussi.

A mes Amis de collègue, lycée, voir de maternelle que je me traîne depuis un moment et pour longtemps encore j'espère. Simon, elle est loin l'époque où on construisait des châteaux de sable et on se foutait des coups de râteau, Romain je n'oublierais jamais ton chat Aghate/Tasspé qui fait partie de mon enfance, Pierrick on se fait un basket quand tu veux, Jérôme-Serge désolé de ne pas avoir pu mettre mon bob lors de la soutenance, je le mets dès que je sors c'est promis. Florian je risque de te voir encore pas mal t'es bien parti pour appartenir à la famille.

Je remercie aussi toute l'équipe du cabinet Monplaisir, Les Drs PERRICARD, METAY et FOURNIER ainsi que leurs assistantes Camille et Caroline pour m'avoir permis de passer un stage de 6ème année très enrichissant.

Table des matières

<u>I) Introduction</u>	1
<u>II) Historique</u>	2
<u>III) Les différentes méthodes d'impression 3D</u>	4
<u>III) 1. L'impression 3D par photopolymérisation</u>	5
III) 1. a. La stéréolithographie.....	5
III) 1. b. La DLP (Digital Light Processing).....	7
III) 1. c. La technologie Polyjet.....	9
III) 1. d. La Technique de polymérisation bi photon (2PP)	10
III) 1. e. Tableau comparatif résumé des technique d'impression 3D par photopolymérisation.....	12
<u>III) 2. L'impression 3D par liage de poudre</u>	13
III) 2. a. Le frittage laser	13
III) 2. b. La technique E-Beam	14
III) 2. c. La méthode 3DP	16
III) 2. d. Le Multi Jet Modeling	17
III) 2. e. Tableau comparatif résumé des technique d'impression 3D par liage de poudre.....	19

<u>III) 3. L'impression 3D par dépôt de matière fondue</u>	20
III) 3. a. La technique FDM	20
III) 3. b. La technique FFF	22
<u>III) 4. L'impression 3D par encollage de papier</u>	23
<u>IV) Exemples d'application</u>	25
<u>IV) 1. L'impression de guides chirurgicaux</u>	25
<u>IV) 2. L'impression de prothèses</u>	26
<u>IV) 3. L'impression de tissus humains et de cellules</u>	28
<u>V) Exploiter l'impression 3D en dentisterie</u>	30
<u>V) 1. Fabrication de modèles calcinables pour coulée en technique de cire perdue par multi jet modeling ou stéréolithographie.</u>	30
<u>V) 2. Fabrication d'armatures pour prothèse adjointes et des châssis de prothèses conjointes par microfusion laser</u>	31
<u>V) 3. Les nombreuses possibilités offertes par la résine et la méthode stéréolithographique</u>	32
<u>VI) Conclusion</u>	36
<u>VII) Bibliographie</u>	37

I) Introduction

L'impression 3D fait depuis quelques temps beaucoup parler d'elle dans notre société. Bien que cette technologie ait vu le jour dans les années 1980, sa popularisation n'est que récente, certainement car ses domaines d'application deviennent de plus en plus nombreux. Cette technologie, autrefois seulement destinée au prototypage rapide, vise désormais aussi la production d'objets finis, dans des domaines aussi variés que l'alimentation, la bijouterie, le textile, le médical ou encore le bâtiment. Ceci est permis par le perfectionnement progressif des différentes techniques d'impression 3D existantes, ayant notamment apporté une plus grande variété de matériaux dont on peut espérer résistance, élasticité, biocompatibilité, ... etc. On assiste de plus à une démocratisation des imprimantes 3D grâce à des coûts moins prohibitifs, avec l'arrivée d'imprimantes personnelles performantes à des tarifs abordables.

L'art dentaire est aussi touché par cette innovation. Il s'agit tout comme la médecine d'un domaine rapidement évolutif, résolument tourné vers l'amélioration technologique, et l'intégration de l'impression 3D à la chaîne de fabrication prothétique n'est en fait que la suite logique de l'adoption progressive de la numérisation et de la conception et fabrication assistée par ordinateur.

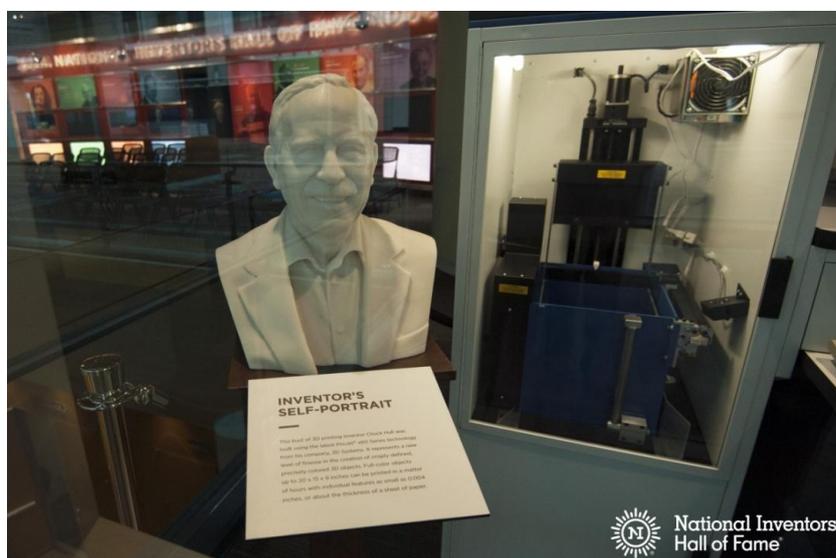
Nous tenterons dans cet exposé, après un bref historique, d'expliquer les différentes méthodes d'impression 3D, leurs fonctionnements respectifs, ainsi que leurs avantages et inconvénients respectifs. Nous verrons par la suite ce que ces différentes facettes d'une même technologie peuvent apporter à la médecine en générale, et plus spécifiquement à la dentisterie moderne.



Dans Tintin et le lac aux requins, publié en 1972, le professeur Tournesol a déjà inventé une sorte de photocopieuse en 3D, bien avant que l'impression 3D ne devienne réalité en 1984 !

II) Historique

La naissance de l'imprimerie 3D est attribuée à Charles Hull, actuel vice-président de 3D Systems (entreprise spécialisée dans l'impression 3D située à Rock Hill en Caroline du Sud, fondée en 1986). Celui ci inventa la stéréolithographie en 1984, la breveta^[1] (il est l'auteur d'une soixantaine de brevets dans le domaine du prototypage rapide) et commercialisa en 1986 un premier prototype. A cette époque l'impression 3d ne ressemblait guère à ce que l'on connaît actuellement, et seules quelques entreprises privilégiées avaient accès à ce premier modèle. Mais c'est grâce à ces premières étapes progressives qu'en 1989 fut produit un premier modèle de série. L'imprimante sert alors aux industriels à créer des objets pour tester leur design avant de décider la production des pièces en série.



Buste de Charles Hull à côté de la première imprimante 3D commercialisée, au National inventors Hall of Fame, à Akron, Ohio.

Par la suite les méthodes vont progressivement s'améliorer, devenant plus fonctionnelles, moins onéreuses, augmentant le nombre de matériaux imprimables, améliorant leurs propriétés, ... L'histoire de l'impression 3d est faite de petites améliorations provenant de différents acteurs, apportant progressivement à la technologie un petit plus. Elle est aussi parsemée de dates marquantes, tels que la première implantation d'une prothèse chez un être humain en 1999, le premier rein fonctionnel imprimé en 3d en 2002, le lancement d'une imprimante autorépliquante open source en 2005 (RepRap project, opérationnelle depuis 2007 et constamment améliorée par les passionnés), le franchissement du cap des 15 000 machines vendues en 2011, puis des 40 000

l'année suivante ^[2], l'impression et la pose couronnée de succès d'une prothèse de mandibule imprimée en 3d sur une femme souffrant d'ostéomyélite ^[3], ou en 2013 l'impression d'une première arme à feu fonctionnelle ^[4] (dont les plans ont été téléchargés plus de 100 000 fois avant la censure du gouvernement américain) ...



Equipe ayant réalisée l'implantation d'une mandibule complète imprimée en 3D lors d'une conférence, le 02/02/2012 (www.uhasselt.be)

Aujourd'hui le marché de l'impression 3d est en pleine expansion et entre dans une phase de transition historique. Deux entreprises de ce domaine, Stratasys et Objet ont fusionnées, devenant le l'entreprise liée à l'impression 3d la plus cotée au monde, puis ont racheté la société Makerbot, la principale société commercialisant des imprimantes 3d à usage personnel. Actuellement, les médias contribuent énormément à mettre l'impression 3d sur le devant de la scène en parlant régulièrement de cette technologie, désormais bien connue du grand public. Les procédés s'améliorent, les prix chutent drastiquement, les possibilités augmentent. Pour conclure ce bref historique, il apparaît intéressant de préciser que pour moins de 400 euro, il est possible de se procurer une imprimante 3d personnelle relativement performante.

III) Les différentes méthodes d'impression 3D

Il n'existe pas de technique unique d'impression en 3D, mais plusieurs avec de nombreuses variantes, nécessitant des équipements et des matériaux différents. Nous décrivons ici les principales, que l'on peut synthétiquement classer en 4 grandes familles :

- L'impression 3D par photopolymérisation.
- L'impression 3D par liage de poudre.
- L'impression 3D par dépôt progressif de matière.
- L'impression 3D par encollage de papier.

Toutes ces techniques ont cependant 2 points communs : une commande numérique (c'est à dire la réalisation par un système d'imprimante 3D) et la nécessité d'une modèle 3D (fichier informatique créé à partir d'un scanner 3D, d'un logiciel de CAO ou obtenue en ligne sur l'un des nombreux sites d'échange et de partage de fichiers). Tous les modèles 3D ont un format informatique unique, à savoir le fichier STL pour "Solid To Layer", le seul accepté actuellement par toutes les imprimantes 3D. Il est à ce jour totalement inenvisageable d'imprimer un objet en 3D à partir d'un croquis ou d'une photo.



Le 10 juin 2014, pour réaliser la promotion de son nouveau monospace, BMW a invité les parents et leurs enfants à dessiner leur voiture familiale^[5]. L'idée était ensuite de modéliser les meilleurs dessins d'enfants en 3D puis de les imprimer. Pour cela, le logiciel "cinema 4D" a permis de passer d'un croquis à un fichier stl exploitable pour une imprimante 3D

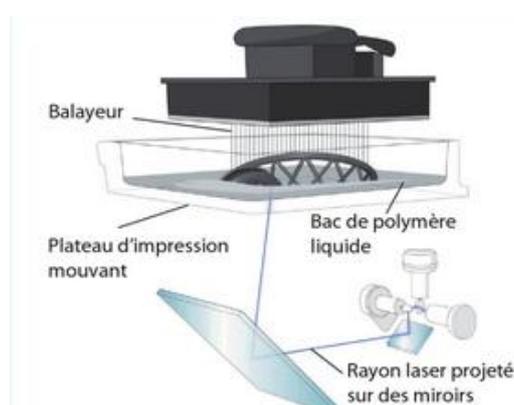
III) 1. L'impression 3D par photopolymérisation

Cette technique se caractérise par l'utilisation de polymères liquides photopolymérisables (photopolymères) . Elle est le fondement de la première technique d'impression 3D mise au point, la stéréolithographie. Elle est aussi utilisée pour deux autres techniques assez répandues, la technique PolyJet et la DLP (Digital Light Processing).

III) 1. a. La stéréolithographie

La stéréolithographie (abrégée SLA pour StereoLithography Apparatus) est une technique mise au point en 1986 par l'entreprise 3D systems. Ici un rayon laser ultraviolet est utilisé pour solidifier couche par couche les photopolymères liquides, généralement de résine acrylique ou époxydique ou encore d'ABS (acrylonitrile butadiène styrène, thermoplastique ayant l'avantage d'être résistant aux chocs).

Les imprimantes SLA sont pourvues d'un réservoir en forme de bac, contenant plusieurs litres de photopolymères liquides. Au sein de ce bac se trouve immergée une plateforme d'impression mobile. Un rayon laser extérieur au bac voit son faisceau redirigé vers ce dernier grâce à un système de miroir. Un système de "balayage" au dessus du bac vient périodiquement rééquilibrer la répartition des photopolymères liquide du bac au cour du processus d'impression.



L'impression 3D par stéréolithographie (James Delaney, Form labs inc.)

Comme pour tout procédé d'impression 3D, le logiciel de la machine commence par analyser le fichier STL. Il découpe alors le volume tridimensionnel en coupes très fines (l'épaisseur est en général de 0,1 ou 0,05mm; Cependant il existe des modèles d'imprimantes beaucoup plus précis réalisant des coupes de l'ordre de 0,01 voir 0,005mm). Il étudie aussi la forme de l'objet et

les conséquences qu'ont les lois de la physique pour ça conception. Cela se traduit par la création d'un socle provisoire et d'attaches pour les parties qui pourraient tomber. Ces supports ne servent que pour la conception et seront éliminés à la fin du processus par dissolution. Le laser va ensuite "dessiner" la première coupe du volume, guidé par les indications de l'ordinateur. Le rayon laser solidifie les photopolymères liquides exposés à la surface du bac, la plateforme mobile descend d'une fraction de millimètre, puis le laser passe à la couche suivante, et ainsi de suite. Le volume est finalement recréé couche par couche, puis la plateforme remonte, permettant la récupération de l'objet. Vient alors la phase de finition, où l'objet est rincé dans un solvant puis placé dans un four à ultraviolet, ce qui achève de solidifier et nettoyer l'objet, tout en détruisant les attaches et le support.

Cette technique est surtout utilisée pour les méthodes de prototypage rapide, "une gamme de nouvelles technologies pour produire en quelques heures des pièces avec précision directement à partir de modèles de Conception Assistée par Ordinateur, avec de petits besoins en intervention humaine"^[6].

Avantages :

- Recul: Son statut de première technique mise au point lui permet de bénéficier de nombreuses années d'expériences et d'améliorations, ce qui en fait la technologie la plus abouties du marché.
- Economie de matière: Ce procédé permet d'obtenir des modèles grandeur nature plus économiquement et plus rapidement que les procédés d'usinage par soustraction.
- Rapide et précis: Les progrès technologiques permettent maintenant de travailler en haute résolution et de produire en moins de 24 h des objets complexes comportant des parties très fines (0,005 mm).
- Echelle: La technique de stéréolithographie permet l'impression de pièces de très grande taille, ce qui est rare parmi les technologies actuelles.
- Solidité : La finition par solidification au four augmente considérablement la résistance de l'objet.

Inconvénients :

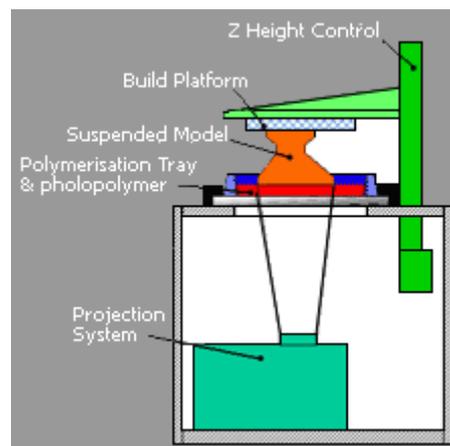
- Coût: La complexité du dispositif et la spécificité des matériaux en font une technologie coûteuse.
- Problème des « volumes piégés ». Le principe étant de superposer des couches successives de matière; la matière présente dans les zones non solidifiées n'est pas éliminée et donc reste présente dans le modèle. Si il s'agit d'un volume hermétiquement clos, la matière est dite "piégée". Exemple: La modélisation d'une coquille d'œuf.
- Déformation : Malheureusement le passage final au four peut entraîner de légères déformations de l'objet (variables selon la qualité de l'imprimante 3D).
- Faible diversité de matériaux et nécessité absolue de finition : On ne peut imprimer que des photopolymères par cette méthode. ce qui entraîne comme rendu l'obtention d'un objet blanc mat semi transparent, fragile, qu'il faudra très fréquemment vernir, enduire, peindre selon l'usage qu'on souhaite en faire.
- Nécessité d'équipements adaptés : un système de ventilation est obligatoire pour évacuer les vapeurs toxiques qui s'échappent des polymères et solvant^[7]. Il en va de même pour les imprimantes 3D personnelles qui doivent fonctionner sous une hotte ou dans une pièce aérée. Des universitaires américains et français ont publié un avertissement quant à la toxicité des fumées liée à l'impression de l'ABS^[8].

Actuellement, les inconvénients de ce procédé font qu'il est surtout exploité par des grands groupes industriels pouvant investir dans cette technique. Cependant de nouveaux acteurs cherchent à ouvrir cette technologie aux plus petites entreprises et aux particuliers, en proposant de petites imprimantes pouvant fonctionner dans un bureau où un labo.

III) 1. b. La DLP (Digital Light Processing)

Cette méthode fonctionne aussi par exposition de photopolymère à la lumière, mais cette fois par l'utilisation d'un projecteur. Ce procédé a été mis au point par Envision TEC, société allemande spécialisée dans le prototypage rapide qui souhaitait investir les marchés de la bijouterie, des prothèses auditives et dentaires. Depuis, cette société commercialise des imprimantes DLP avec des logiciels spécifiques à l'usage dentaire intégrés, servant à la production de modèles et dies^[9].

La lumière permettant la photopolymérisation provient d'une puce qui balaie la surface du réservoir. Cette puce, faite de multiples miroirs microscopiques, permet un balayage de grande précision et permet le fonctionnement du projecteur. A partir du fichier STL, l'ordinateur va établir un tracé de l'objet. Le projecteur va envoyer les rayons UV en direction de la puce, qui va permettre ou non le passage de la lumière (système de type porte ouverte/porte fermée). La puce est contrôlée informatiquement en fonction du tracé établi. Ensuite la plateforme contenant les photopolymères s'abaisse sur l'axe vertical. Cette absence de déplacement de la source de lumière permet une impression plus rapide que pour les techniques stéréolithographiques.



Fonctionnement d'une imprimante DLP (www.AllinBox.com)

Avantages :

- Rapidité : Réduction du temps d'impression d'environ 30% par rapport aux imprimantes SLA. Il ne faut que 8 secondes pour solidifier une couche d'environ 0.1mm
- Large éventail de matériaux: Les possibilités sont plus étendues que pour la SLA du fait de l'absence de système de cuve qui impose à la stéréolithographie l'usage de photopolymères liquides. On peut ainsi avoir des matériaux plus durs, avec un meilleur niveau de finition. On trouve aussi des résines claires, des cires de moulage...

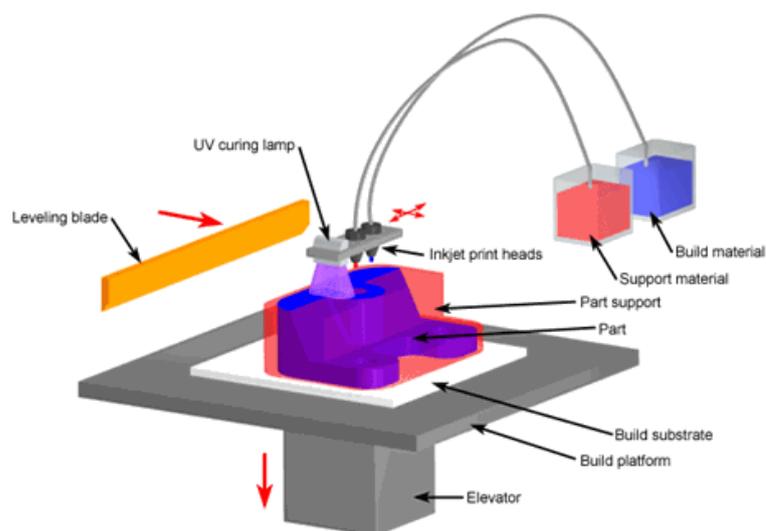
Inconvénients :

- Coût : Moins abouti et moins répandu que les technologies SLA, le coût des imprimantes DLP reste très prohibitif.

- Impression monochrome : Pour l'instant on ne peut imprimer qu'un matériau pour une même pièce, cependant des imprimantes multi-cuves sont actuellement en cours de développement.

III) 1. c. La technologie Polyjet

Le principe de l'impression 3D PolyJet est similaire à l'impression à jet d'encre, mais au lieu d'injecter des gouttes d'encre sur du papier, les imprimantes PolyJet 3D injectent des couches de liquide photopolymère durcissable sur un plateau de fabrication. Là encore, tout commence par le travail d'un logiciel de préparation de fabrication. Ce dernier calcule automatiquement le placement des photopolymères et du matériau de support à partir d'un fichier STL. Ensuite l'imprimante 3D injecte de minuscules gouttelettes de photopolymère liquide, formant la première couche. Un traitement UV est immédiatement appliqué, puis l'imprimante passe à la seconde couche. Les fines couches s'accumulent sur le plateau de fabrication pour créer, avec une grande précision, un ou plusieurs modèles ou pièces 3D. Lorsque des parties en saillie ou complexes nécessitent un support, l'imprimante 3D injecte un matériau de support amovible (l'utilisateur peut par la suite retirer facilement le matériau de support à la main, avec de l'eau ou dans un bain de solution).



Fonctionnement d'une imprimante Polyjet (www.customPartNet.com)

Avantages :

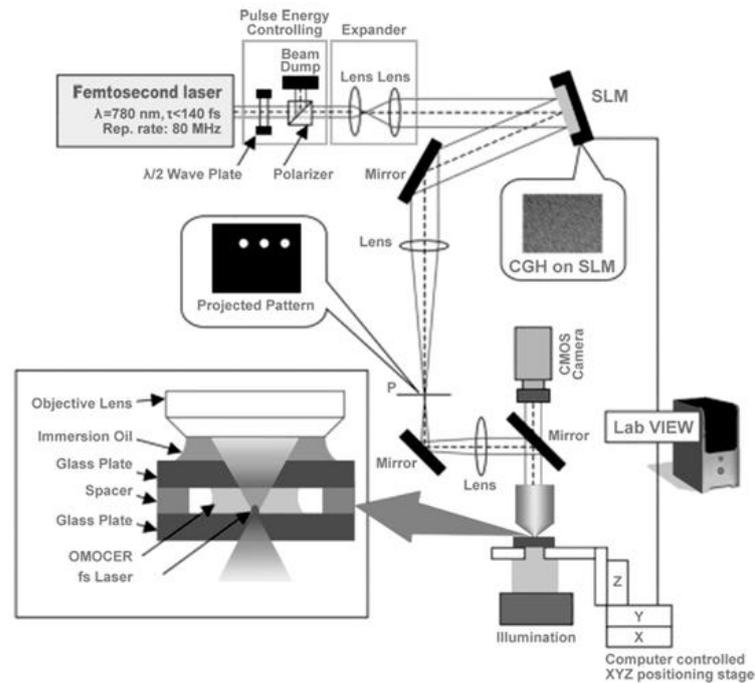
- Pas de finitions nécessaire : Les modèles et les pièces sont prêts à l'utilisation dès leur sortie de l'imprimante 3D, aucun séchage supplémentaire n'est nécessaire.
- Possibilité de mixer les matériaux : Certaines imprimantes présentent des têtes d'impression multiples, proposant ainsi l'impression en combinaison de matériaux souples et rigides, opaques et transparents ou de différentes couleurs...
- La plus large gamme de matériaux : On compte plus de 120 matériaux différents, combinables dans plusieurs têtes d'impression ou mélangeables dans la même. Cela permet de jongler entre les différentes propriétés des matériaux.

Inconvénients :

- La précision est légèrement inférieure à celle de imprimantes SLA et DLP pour la même gamme d'imprimante.
- Les pièces PJET sont peu solides (leur robustesse est comparable à celle des pièces obtenues par SLA, avec une faible résistance à la chaleur et aux UV).

III) 1. d. La Technique de polymérisation bi photon (2PP)

La 2PP (Two Photon Polymerization) permet de fabriquer des objets à l'échelle nanométrique. La précision peut atteindre 100 nm. Pour cela, un laser à lumière pulsée est concentré sur une solution de photopolymères, causant la polymérisation uniquement à l'endroit où la lumière est la plus intense. cette technique permet d'imprimer des structures uniquement visibles au microscope, avec un degré de précision jamais atteint auparavant. Cette précision submicronique ouvre de nouveaux horizons en ingénierie tissulaire et médecine régénérative^[10] (de part la possibilité d'imprimer des microporosités avec un degré de précision élevé).



Fonctionnement schématique d'une imprimante 2PP (www.rocbor.net)

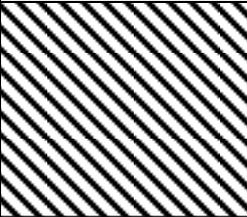
Avantages :

- Aucune attache de support nécessaire.
- Précision inégalée.

Inconvénients :

- Temps d'impression très long, bien que récemment diminué par l'université de Vienne qui, grâce au développement de nouveaux matériaux et d'une nouvelle imprimante à pu augmenter la vitesse d'impression de 100 micromètres par seconde à 5 mètres seconde, permettant ainsi d'envisager l'impression à une vitesse acceptable de modèles de grande taille et d'une précision record^[11]. Cette vitesse élevée, théoriquement atteignable pour des modèles de grandes taille n'est toutefois actuellement atteinte que pour des modèles de taille millimétrique pour des raisons de logistique.

III) 1. e. Tableau comparatif résumé des technique d'impression 3D par photopolymérisation

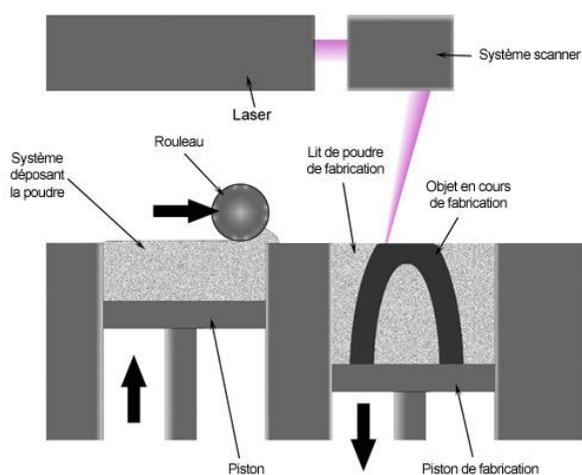
<u>TABLEAU COMPARATIF DES METHODES D'IMPRESSION 3D PAR PHOTOPOLYMERISATION</u>				
	<u>Stéréolithographie</u>	<u>Digital Light Processing</u>	<u>Technique PolyJet</u>	<u>Technique de polymérisation bi photon</u>
<u>Précision</u>	Coupe de 0,1mm à 0,005 mm selon les modèles	Elevée (0,05mm)	Plus faible (0,1mm)	La plus élevée (100nm)
<u>Choix de matériaux</u>	Faible	Elevé	Très élevé	Faible
<u>Finitions nécessaires</u>	Finitions longues et contraignantes	Peu de finitions	Pas de finitions	Pas de finitions
<u>Coût</u>	Elevé	Très élevé	Moyen	Très élevé
<u>Coloration possible</u>	Non	Non	Oui	Sans objet
<u>Taille des pièces</u>	De taille millimétrique à très grandes (>1m)	De taille peu élevée (<1m)	De taille peu élevée (<1m)	De taille très petite
<u>Vitesse d'impression</u>	Elevée	La plus élevée	Moyenne	Faible
<u>Le petit +</u>	Méthode avec le plus gros recul	Technique d'impression la plus rapide	Possibilité de mixer les matériaux	Technique d'impression la plus précise
<u>Le petit -</u>	Problème d'émanations toxiques	Moins abouti et moins répandu que les autres techniques	Mauvais vieillissement des pièces	Technique récente nécessitant encore des améliorations

III) 2. L'impression 3D par liage de poudre

La particularité de ces techniques est l'usage de poudre comme matériau de base. Cette poudre va ensuite fusionner localement petit à petit selon des techniques variées. L'avantage majeur de ces techniques est la grande diversité de matériaux pouvant être employés, notamment l'usage de métal, l'une des plus grandes avancées dans le domaine de l'impression 3D.

III) 2. a. Le frittage laser

Aussi appelée SLS (Selective Laser Sintering), cette technologie a été mise au point par la société allemande EOS. Ici, c'est un laser puissant qui va fusionner les particules de poudre. Comme pour toute technique d'impression 3D, un logiciel de CAO découpe d'abord le fichier image en fines couches. Le bac de poudre est tout d'abord préchauffé à une température à peine inférieure au point de fusion de la poudre. Une fine couche de poudre est ensuite étalée par un rouleau. Le laser vient ensuite "coaguler" la poudre en passant selon le schéma défini par l'ordinateur. Une fois cette première couche "fusionnée", le rouleau vient étaler une nouvelle couche de poudre, le laser passe à nouveau et ainsi de suite, jusqu'à la fabrication complète de l'objet. La pièce est ensuite retirée du bac et nettoyée des particules de poudres qui n'ont pas fusionné.



Représentation schématique d'une imprimante SLS (materialgeez, www.wikimedia.org)

Avantages :

- Large choix de matériaux aux propriétés intéressantes : La SLS permet de fusionner tout matériau du moment que celui ci a été conditionné sous forme de poudre homogène fine d'environ 50 micromètres de diamètre . Le matériau le plus courant est le polyamide, mais on peut aussi imprimer des céramiques, du verre ou divers métaux (acier inoxydable, cobalt chrome, titane Ti6AlV4...)^[12].

- Economie de matière : La poudre non fusionnée n'est pas affectée par le passage du laser et peut être réutilisée pour la prochaine impression.

- Absence de support : Les pièces peuvent le plus souvent être construites sans une structure-support en plus, étant stabilisées par la poudre non polymérisée.

Inconvénients :

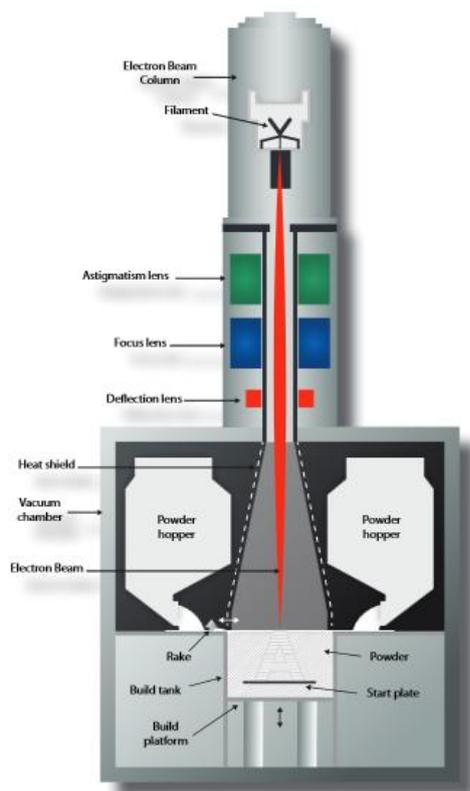
- Nécessité de finitions : Le rendu est assez granuleux , par rapport aux techniques basées sur la photopolymérisation qui ont un rendu plus lisse. De plus, pour les impressions en polyamide le matériau peut avoir besoin d'être coloré car la poudre est blanche. On peut aussi lisser les pièces en les ponçant.

- Précision réduite : La précision moyenne du frittage laser est de l'ordre de 0,1mm. elle est donc inférieure aux techniques stéréolithographiques.

- Méthode complexe : Les conditions pour obtenir une impression de grande qualité et très précise sont assez complexes à réunir. Il faut travailler sur la régularité des grains, la qualité du logiciel de CFAO, la qualité et la longueur d'onde du laser...

III) 2. b. La technique E-Beam

La technologie E-beam ou EBM (Electrique Beam Melting) permet la fusion du métal grâce à un laser à électron. Une poudre de métal est fondue par les électrons, projetés à grande vitesse, permettant la fusion du métal dans une chambre à vide, où la température s'élève entre 700 et 1000°C. Le métal va ainsi fusionner, couche après couche.



Fonctionnement schématique d'une imprimante EBM (www.Arcam.com)

Avantages :

- Rapidité : Vitesse d'impression supérieure à celle des techniques SLS du fait d'une plus haute densité en énergie du laser et à la possibilité pour le faisceau d'électron de se séparer.
- Risque diminué de déformations : Le fait de préchauffer la poudre avant de la faire fondre limite les déformations et réduit ainsi le besoin de renforts et de supports lors de la fabrication.

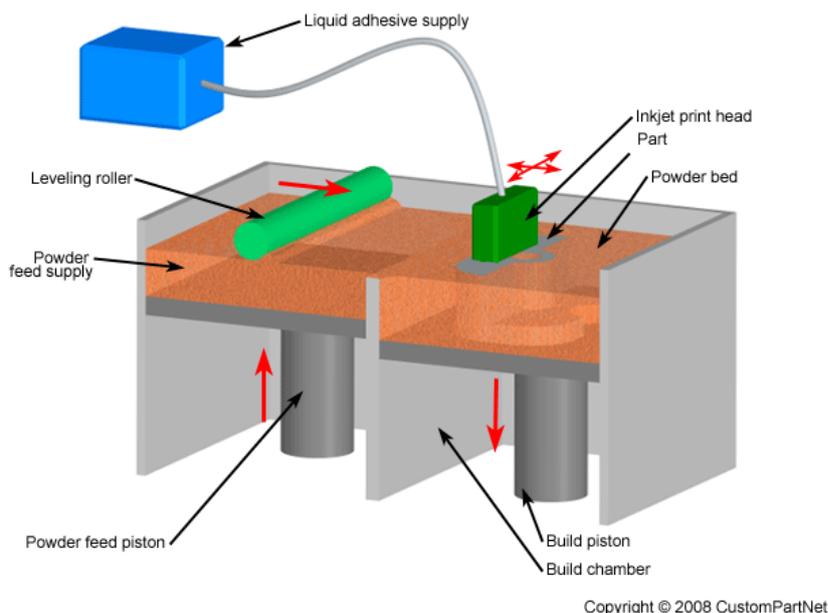
Inconvénients :

- Précision réduite par rapport aux SLS : Au niveau de la poudre, le faisceau d'électrons est un peu plus large que le faisceau laser ce qui ne lui permet pas d'atteindre la même précision.
- Faible taille des pièces pouvant être fabriquée: La machine commercialisée ayant le plus grand volume de fabrication autorise un diamètre maximum de 350mm pour une hauteur de 380mm^[13] quand des machines laser offrent déjà des volumes de fabrication au moins deux fois plus élevés.

- Réutilisation immédiate impossible : Les résidus non fusionnés doivent être revérifiés avant de pouvoir être réutilisés, du fait de l'importance de la puissance du faisceau utilisé. Il existe cependant une amélioration de l'EBM, appelée EBDM (Electron Beam Direct Manufacturing) développée par des ingénieurs de la NASA, permettant l'impression 3D de métaux dans des environnement zéro gravité. L'absence de gravité permet l'impression de métaux de meilleur qualité (pour des raisons de poids de poudre n'ayant plus d'influence sous G zéro) avec une robustesse élevée et une meilleur résistance thermique^[14].

III) 2. c. La méthode 3DP

Cette technologie, inventé au MIT^[15] (Massachussetts Institute of Technologie) et rachetée par la société 3D Systems en 2012, est à ce jour (avec le laminage papier par dépôt sélectif abordé dans la suite de cet exposé) le seul procédé permettant l'impression simultanée de milliers de couleur. Un rouleau étale sur une plateforme une très fine couche de poudre. Une tête d'impression vient ensuite déposer très précisément une minuscule goutte de glue pour venir solidifier localement la poudre. La plateforme s'abaisse alors, pour qu'un rouleau vienne étaler la couche de poudre suivante. Le procédé se poursuit et l'objet est reconstitué couche par couche. La coloration est permise par l'utilisation de glues teintées, réparties dans plusieurs têtes d'impression et pouvant être mélangées. La pièce imprimée subit ensuite un traitement final d'élimination des excès de poudre et de chauffage augmentant sa solidité.



Représentation schématique d'une imprimante 3DP (www.custompartnet.com)

Avantages :

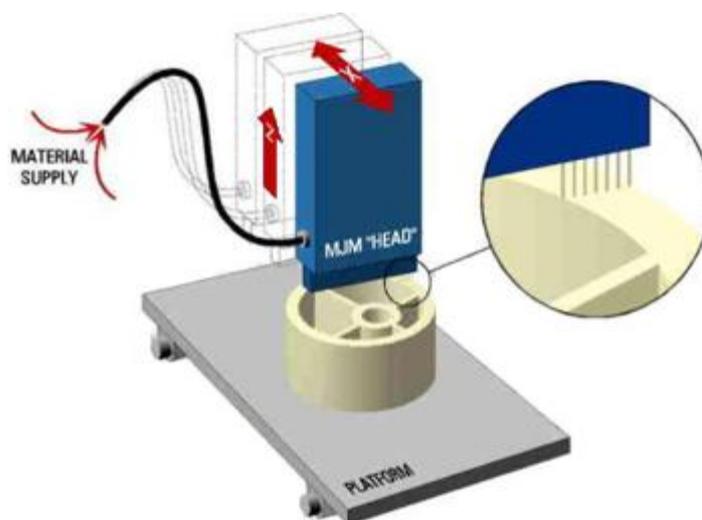
- Possibilité de coloration.
- Large éventail de matériaux disponibles et de formes réalisables : Grâce aux têtes d'impression, divers matériaux liquides ou mous peuvent être utilisés (céramique, métal, polymères, composites). Il est de plus possible de créer des designs en surplomb ou en filet sans attaches ou support.
- Coût moins prohibitif que celui des machines fonctionnant par stéréolithographie (on peut diviser le prix par 6 selon les modèles).

Inconvénients :

- Nécessité de finitions.
- Précision variable et qualité d'impression moindre : Le coût de revient moins élevé se fait au détriment de la résistance des pièces réalisées, souvent cassantes, et de la qualité de leur texture, souvent rugueuse. De manière générale la qualité d'impression est inférieure à celle des techniques SLA ou DLP^[16].

III) 2. d. Le Multi Jet Modeling

Cette technique à jet d'encre est moins employée que le frittage laser ou la 3DP. Ce système se rapproche beaucoup de la 3DP. La différence est qu'ici la matière n'attend pas la glue dans un bac mais est déposée par une tête d'impression, comme pour une impression à jet d'encre 2D. Cependant, la tête d'impression dispose de centaines de buses de sortie où le matériel est déposé par goutte de très fin diamètre de l'ordre du micron). La glue est ensuite appliquée pour solidifier l'objet. Une tête supplémentaire peut servir à imprimer un support pour l'objet réel.



Représentation schématique d'une imprimante Multi Jet Modeling (www.3d-labs.de)

Avantages :

- Réalisation de moules : Souvent la cire fondue est utilisée comme matière première, permettant ainsi la réalisation de moules par la technique de cire perdue.

Inconvénients :

- Utilisation de matériaux particuliers : Ce procédé présente l'inconvénient de nécessiter des matériaux aux propriétés physiques spéciales (équilibre subtil entre tension et faible viscosité, pour simultanément tenir sur la plateforme d'impression et pouvoir être imprimée par goutte). Cela implique aussi la nécessité d'imprimer fréquemment un support, ce qui utilise une grande quantité de matière .

III) 2. e. Tableau comparatif résumé des technique d'impression 3D par liage de poudre

<u>TABLEAU COMPARATIF DES METHODES D'IMPRESSION 3D PAR LIAGE DE POUDRE</u>				
	<u>Frittage laser</u>	<u>Technique E-Beam</u>	<u>Méthode 3DP</u>	<u>Multi Jet Modeling</u>
<u>Précision</u>	Réduite (0,1mm)	Inférieure au frittage laser	Très faible	Très faible
<u>Choix de matériaux</u>	Large	Large	Large	Faible
<u>Finitions nécessaires</u>	Finitions longues dues à l'aspect granuleux	Peu de finitions	Finitions longues (élimination des excès et chauffage)	Peu de finitions
<u>Coût</u>	Elevé	Elevé	Faible	Moyen
<u>Coloration possible</u>	Non	Non	Oui	Non
<u>Taille des pièces pouvant être fabriquées</u>	Petite à très grandes (>1m)	Taille très limitée (35cm de diamètre par 38cm de haut)	<1m	Objets de petite taille car solidité faible
<u>Vitesse d'impression</u>	Elevée	Très élevée	Elevée	Très élevée
<u>Le petit +</u>	Possibilité d'imprimer du Ti6AlV4	Pièce d'une très grande résistance grâce à la chambre de préchauffage	Impression simultanée d'un millier de couleur possible	Idéal pour réaliser des moules pour la coulée en cire perdue
<u>Le petit -</u>	Méthode complexe, beaucoup de paramètres à gérer (granulométrie de la poudre, puissance du laser etc.)	Volume des pièces fortement limité	Qualité des pièces faible (rugueuses, cassantes...)	Gourmand en matière car nécessité de soutenir le matériau imprimé

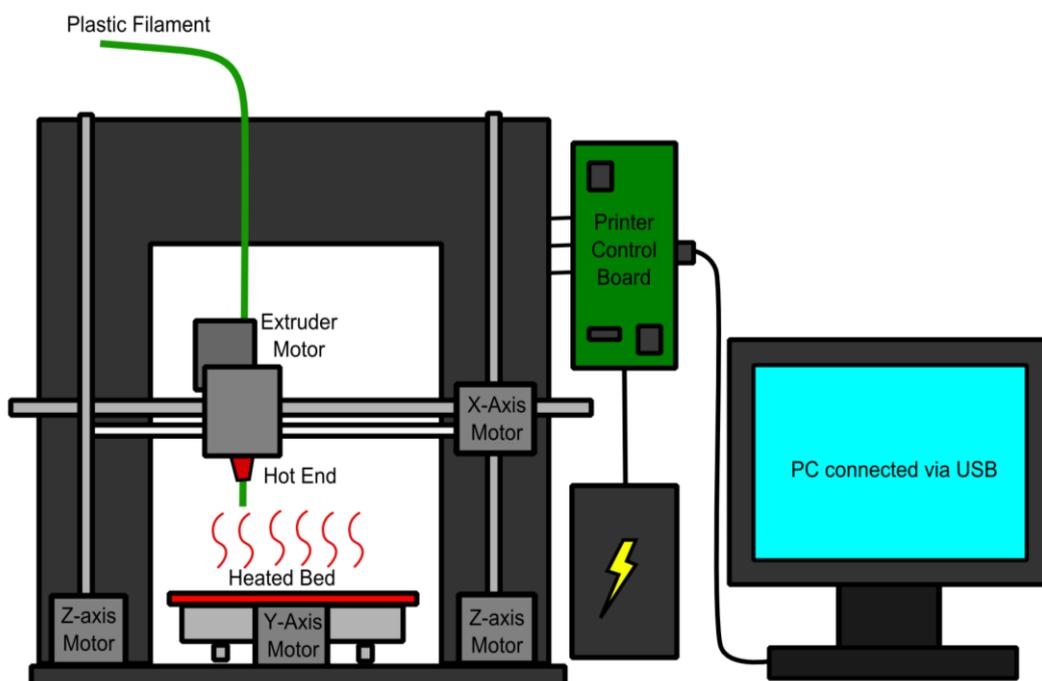
III) 3. L'impression 3D par dépôt de matière fondue

A l'inverse des techniques précédentes se servant de la polymérisation de résine ou d'un liant, ces méthode déposent la matière fondue au fur et à mesure. On parle de technique de dépôt de filament fondue, principalement représentée par la FDM (Fused Deposition Modeling).

III) 3. a. La technique FDM

C'est le procédé d'impression 3D le plus ancien après la stéréolithographie. Elle a été mise au point par S Scott Crump en 1989, et commercialisée à partir des années 1992^[17]. Il a récemment été popularisé par l'arrivée des imprimantes 3D personnelles, la société MakerBot et le projet RepRap que nous verrons plus loin.

Cette technique commence comme toutes les autres, par l'étude du fichier CAO pour réaliser des coupes 2D de l'objet. L'imprimante fonctionne ensuite par dépôt continu de filament fondu (plastique ou métaux) via une buse d'extrusion chauffée à une température spécifique au matériau utilisé. La matière est déposée en couche très fines (0,04mm d'épaisseur en moyenne), et l'objet est ainsi reconstitué de la base au sommet, couche après couche.



Fonctionnement schématique d'une imprimante 3D FDM (www.3dprintingtech.cc)

Avantages :

- Forte variété de matériaux utilisés : Les matériaux fréquemment utilisés sont les thermoplastiques. Parmi ceux ci on retrouve notamment des imprimantes capables d'imprimer du ULTEM 9085, un plastique très résistant au feu et très utilisé dans l'aérospatial. La tête d'impression peut aussi, sur certains modèles, être remplacée par une seringue et imprimer des aliments (fromage, chocolat), des cires... Certaines imprimantes sont même spécialisées dans l'impression de cellules (les imprimantes de la marque ORGANOVO sont spécialisées dans ce domaine)^[18].
- Rapidité d'impression (un filament de matière de 5 à 15 cm de long peut être imprimé en une heure).
- Possibilité d'imprimer plusieurs couleurs voir plusieurs matériaux sur certains modèles à têtes d'extrusion multiples.
- Faible coût des consommables : Comparée aux technique par photopolymérisation, le coût des matériaux au kilo varie entre 20 et 50 euro le kilogramme, contre une centaine d'euro pour un litre de résine. Il faut ajouter à cela qu'on imprimera un volume plus important avec un kilogramme de filament qu'avec un litre de résine.

Inconvénient :

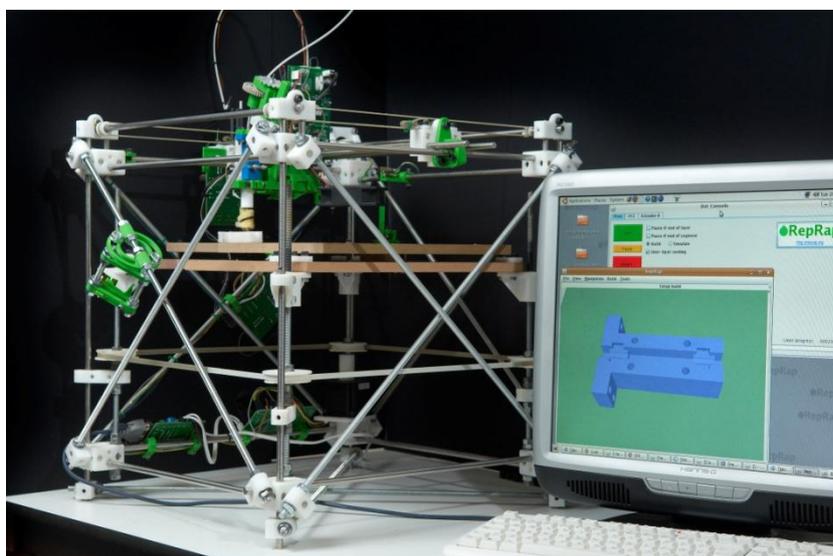
- Précision variable, complexité d'utilisation : Il existe de nombreux modèles d'imprimante 3D. Outre les variations de coût et de matériaux utilisables, la précision est très variable, et n'est pas toujours bien satisfaisante, surtout pour les imprimantes personnelles : La plupart sont fournies en kit et impose à l'utilisateur de calibrer et paramétrer lui même sa machine en fonction du matériau utilisé. De plus le filament est parfois difficile à contrôler pour certains matériaux. En revanche, une fois l'imprimante calibrée, elle nécessite peu d'entretien.
- Encombrant : Les imprimantes professionnelles capable de produire des pièces en métal sont volumineuses et lourdes. Par exemple, l'imprimante Fortus 900mc de la société Stratasys mesure 277,2cm de long par 168,3cm de large par 202,7cm de haut, pour un poids de 3287 kg. En revanche, els imprimantes de la même société destinées uniquement à l'impression de plastiques occupent un volume inférieur à un mètre cube pour un poids de moins de 150kg.

- Toxicité : Comme pour l'impression par stéréolithographie, le thermoplastique ABS chauffé produit des vapeurs toxiques. L'usage d'un système de ventilation type hôte est fortement recommandé.

III) 3. b. La technique FFF

Contrairement à ce qu'on pourrait croire, la FFF est une technique identique à la FDM. En effet, l'appellation Fuse Deposition Modeling et son abréviation, FDM, sont des marques déposées de la société Stratasys^[19]. Les autres acteurs souhaitant utiliser un procédé similaire emploient donc le généralement le terme Fused Filament Fabrication. Parmi eux les imprimantes RepRap (pour Replication Rapid prototyper) sont les plus répandues, car porteuse de nombreuses promesses et d'une philosophie intéressante.

RepRap est un projet britannique né à l'université de Bath ayant pour but de créer une imprimante 3D, en partie autorépliquable (une RepRap peut imprimer un certain nombre de pièces d'une autre RepRap) et surtout open source (c'est à dire libre de tout brevet), et dont les plans sont disponibles pour tout le monde. Ce projet et ses machines se développent et sont améliorés constamment par une communauté mondiale très active.



Le modèle RepRap Darwin, 1er modèle d'imprimante distribué par le projet (www.reprap.org)

Avantages :

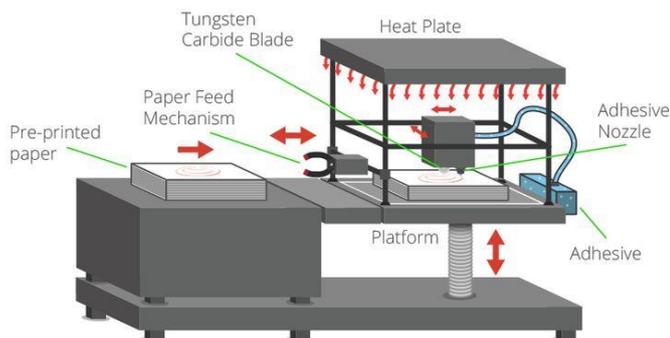
- Coût réduit: Le fait que l'imprimante soit libre de brevets et qu'elle puisse s'autorépliquer en fait la plus abordable du marché.
- Communauté très vivante : De nombreux tutoriels, sites de partages et d'entraide existent du fait de l'accès libre. Cela permet aussi une amélioration et une évolution permanente, chacun apportant sa pierre à l'édifice.

Inconvénients :

- Limitation de taille des pièces : la machine telle qu'elle est dimensionnée ne peut que produire des pièces de petite taille (bien que variable selon les différents modèles existants, les dimensions d'impression sont toutes légèrement en deçà de 20 cm de long par 20 cm de large par 20 cm de haut) .
- Faible choix de matériaux: Le principal matériau utilisable est le plastique. Dans les modèles les plus récents il est également possible de produire des éléments en métal conducteur, après un changement de tête du RepRap. Cependant l'éventail de matériaux reste moins large que pour les imprimantes FDM.
- Réplication encore partielle : L'électronique de contrôle, les moteurs, et l'informatique ne sont pas encore imprimables à l'heure actuelle.

III) 4. L'impression 3D par encollage de papier

Aussi appelé SDL (Selective Deposition Laminated) ou laminage par dépôt sélectif, cette technique mise au point en 2005 diffère de tous les procédés de fabrication précédents. Des feuilles de papier sont encollées les unes aux autres pour reconstituer un volume 3D. La conservation de la forme recherchée est permise par un dépôt localisé de colle sur la zone qui deviendra l'objet. A chaque nouvelle feuille, un lit d'impression chauffant vient coller les couches entre elles en les pressant une fois la colle déposée.



Fonctionnement schématique d'une imprimante 3D par encollage de papier (www.pinterest.com)

Avantages :

- Système le plus économique du marché.
- Possibilité d'imprimer en couleur : Les feuilles de papiers peuvent préalablement être colorée par une imprimante "classique" avant d'être encollée. Ceci est permis par le logiciel d'analyse du fichier stl qui, là encore, transforme le volume 3D en coupe en 2D.

Inconvénients :

- Finitions longues : Le résultat final nécessite un long travail de finition. En effet, il est nécessaire de couper tous les excès de feuille non encollés, souvent à l'aide d'une lame très aiguisée ou d'un marteau et de ciseaux. Ces étapes sont délicates et fastidieuses.
- Limitations technique : Certaines formes complexes où les pièces présentant des creux ou des volumes internes sont moins faciles à réaliser, le retrait des excès de papier étant difficiles voir impossibles à réaliser.
- Faible choix de matériaux : Outre le papier, certains thermoplastiques peuvent être imprimés selon cette méthode, de même que certains matériaux composites (métaux ferreux ou non ferreux, céramique) mais cela reste rare.

IV) Exemples d'application

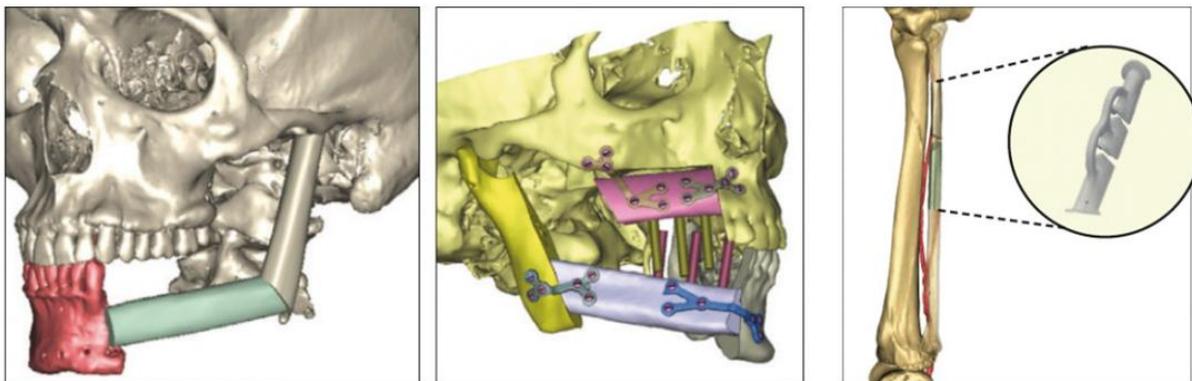
Nous allons à présent visualiser les possibilités qu'offre l'impression 3D dans le domaine de la santé à travers quelques exemples. Grâce à des dispositifs médicaux fabriqués sur mesure pour le patient, la précision du geste chirurgical est augmentée et les résultats opératoires améliorés.

IV) 1. L'impression de guides chirurgicaux

En France l'impression 3D est, depuis 2012, fréquemment utilisée pour créer des dispositifs médicaux sur mesure. C'est en particulier le cas de la chirurgie maxillo-faciale, où l'on utilise des guides imprimés en 3D lors des opérations de reconstruction de la mâchoire après envahissement osseux par un cancer oro-facial. Classiquement l'opération consiste à recréer une mandibule à partir de plusieurs sections du fibula (péroné) qui, mis bout à bout forment un U, à l'image de la mandibule.

À partir des images scanner, les chirurgiens calculent les trajectoires de découpe osseuse et déterminent les angulations et longueurs des fragments osseux en fonction de la morphologie du malade. Puis ils impriment un modèle de mandibule conforme aux données numériques. Cela permet, en se conformant à l'anatomie osseuse du patient de réduire le temps opératoire (et donc la durée d'anesthésie) et le trauma opératoire lié aux éventuelles imprécisions entraînant des retouches.

Une autre technique va même encore plus loin dans la précision et la diminution de l'invasivité. A l'hôpital de la Pitié Salpêtrière, les données numériques sont transmises aux ingénieurs de l'entreprise OBL, filiale de la société Materialise à Châtillon (Hauts-de-Seine), afin qu'ils conçoivent et impriment en 3D divers outils dont des guides de coupe osseuse. En plastique et vissé au péroné, le premier comporte plusieurs rainures qui indiquent le tracé et l'inclinaison des trajectoires de coupe que va réaliser le chirurgien. Un second guide, appliqué sur la mandibule dont il suit fidèlement les contours, sert également à aider le chirurgien pour découper le segment selon les trajectoires planifiées. Pour finir, des plaques d'ostéosynthèse en titane imprimées en 3D solidarisent les différents segments de péroné qui auront été prélevés pour reconstruire la nouvelle mandibule^[20].



Reconstitution prévisionnelle de la future mandibule, avec prévision de l'emplacement des plaques d'ostéosynthèse et représentation schématique du guide de découpe du péroné imprimé en 3D^[21](schéma explicatif : www.nouvelobs.com).

Récemment à Lyon, l'impression 3D a aussi été utilisée pour traiter les malformations cranio faciales des nouveaux nés, à l'hôpital Femme-Mère-Enfant. L'équipe du Pr Arnaud Gleizal et du Dr Jean-Thomas a entrepris d'utiliser des guides de coupe imprimés en 3D pour opérer des enfants âgés de 6 à 12 mois atteints de craniosténose (pathologie qui se traduit par la fermeture prématurée des sutures du crâne et une réduction du volume de la boîte crânienne).

IV) 2. L'impression de prothèses

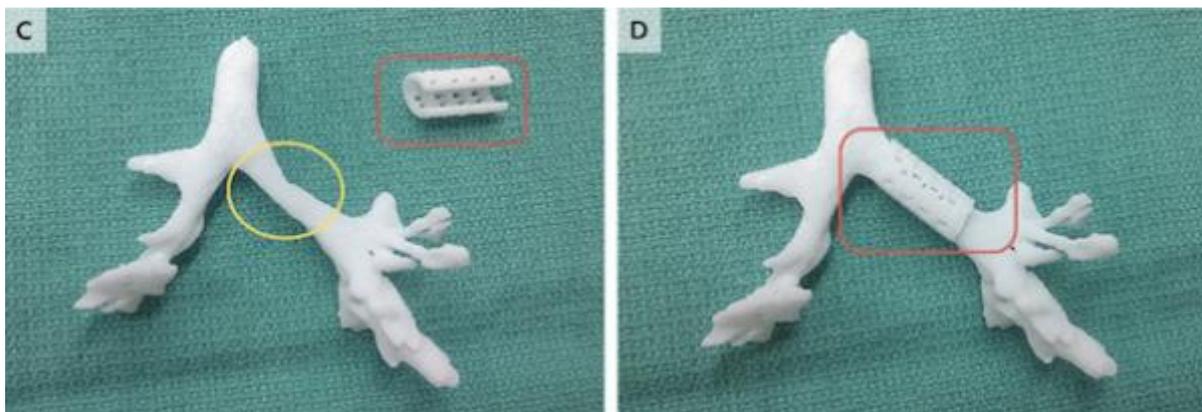
Depuis plusieurs mois, l'impression 3D révolutionne certains domaines de la médecine en utilisant des matériaux adaptés et diversifiés (plastiques, résines polymères, titane, céramique) mais aussi vivants. Récemment, des sternums en titane imprimés en 3D ont été implantés, l'un chez une patiente chinoise de 54 ans porteuse d'une tumeur, l'autre sur un Espagnol du même âge porteur d'une volumineuse tumeur cancéreuse de la paroi thoracique. Une réplique 3D en titane de la deuxième vertèbre cervicale a également été implantée l'an dernier chez un garçon chinois de 12 ans souffrant d'un cancer osseux. Une voûte crânienne en Plexiglas[®] aussi été implantée aux Pays Bas en 2014^[22].



Imprimée en 3D, cette calotte crânienne en plastique a été implantée par une équipe de l'Université d'Utrecht (Pays-Bas) en 2014 (©H.J. Hunink Producties/REX)

De même, Kaiba, un jeune Américain qui souffrait à la naissance de trachéobronchomalacie (une maladie caractérisée par une faiblesse de la paroi de la trachée et des bronches, qui s'affaisse très fortement lors de l'expiration) a pu être traité par l'implantation chirurgicale d'une prothèse imprimée en 3D. Placé sous ventilation artificielle afin d'éviter les arrêts cardio-respiratoires, Kaiba aurait été condamné à court terme. Les chirurgiens de l'Université du Michigan à Ann Arbor (États-Unis) ont eu l'idée de fabriquer un objet sur mesure, qui épouserait le contour de la grosse bronche gauche afin d'éviter qu'elle ne s'affaisse.

Après étude d'un scanner du nourrisson, aidés par la société belge Materialise, ils ont imprimé en 3D un "stent" en polycaprolactone (une variété de polyester biocompatible) qu'ils décrivent comme un *"tuyau flexible d'aspirateur"*, qui maintient ouverte la bronche sur laquelle il a été fixé par des points de suture. Souple, elle a pu suivre la croissance de la bronche ; biodégradable, elle s'est résorbée au bout de trois ans, le temps nécessaire pour que les symptômes disparaissent. L'opération, réalisée en février 2012 alors que l'enfant avait 3 mois, a été une réussite. Trois semaines plus tard, Kaiba n'était plus relié au ventilateur et a pu quitter l'hôpital. Depuis, deux autres nourrissons de 5 et 16 mois ont bénéficié de l'implantation de dispositifs spécialement fabriqués pour eux par impression 3D^[23].



*Voici la prothèse qui a été implantée à Kaiba, et son support, tout deux imprimés en 3D
(www.lesimprimantes3d.fr)*

IV) 3. L'impression de tissus humains et de cellules

Le “bioprinting“ est une technique permettant de créer des tissus humains par le biais d'imprimantes 3D.

Des cellules humaines provenant de biopsies de patients ou de cellules souches sont cultivées dans un milieu de croissance selon des techniques standard, ce qui leur permet de se multiplier. Une fois que le pool cellulaire est suffisamment important du fait des divisions successives, ces dernières sont recueillies et chargées dans une cartouche pour créer le “BioInk“ (encre biologique). Cet encre biologique est chargée dans une imprimante Novogen MMX avec une cartouche d'hydrogel ou une cartouche d'un mélange de sucre et d'eau qui servira de liant temporaire entre les couches de cellules qui seront superposées lors du processus d'impression. La machine 3D imprime une couche de gel à base d'eau, suivie d'une couche de cellules d'encre biologique, et ainsi de suite. Les deux couches fusionnent naturellement entre elles. Pour finir, après avoir laissé le tissu imprimé se reposer et se développer, on enlève ces couches intermédiaires^[24].



*L'imprimante Novogen MMX, capable de bio imprimer des cellules et tissus humains
(www.biotecnika.org)*

Actuellement, les tissus imprimés sont généralement utilisés pour la recherche médicale. On surveille l'évolution des tissus imprimés, leur réaction face à des maladies... Mais il est très probable qu'à l'avenir on crée des tissus fonctionnels pour les implanter dans les organes. En 2014, la société Organovo a bio-imprimé son premier tissu du foie en 3D^[25]. En 2010, la société avait également imprimé le premier vaisseau sanguin humain sans l'utilisation d'hydrogel de support. Depuis la société Organovo développe la commercialisation de son tissu de foie imprimé pour les sociétés pharmaceutiques et les laboratoires de recherche. De même en août 2013, l'université Hangzhou Dianzi en Chine a annoncé avoir créé une nouvelle imprimante 3D "biomatérielle", ayant imprimé un rein de petite taille^[26].

Pour finir, il convient néanmoins de souligner que malgré ces progrès de nombreuses années sont encore nécessaires avant que des transplantations d'organes imprimés en 3D soient autorisées sur des humains. En effet, sur le plan de l'éthique et de la morale, plusieurs chercheurs ont manifesté leur inquiétude concernant la qualité des organes, leur innocuité, leur dégradation biologique, l'efficacité de leur fonction ou encore le contrôle de leur production.

V) Exploiter l'impression 3D en dentisterie

Comme nous allons le voir l'impression 3D peut intervenir à différentes étapes de conception de prothèses dentaires, qu'il s'agisse de prothèses partielles amovibles métalliques, de couronnes ou de gouttières. Les technologies les plus répandues à l'heure actuelle sont le multi jet modeling et la technique stéréolithographique. En revanche l'amélioration des techniques de frittage laser en terme de finitions, précision et qualité des matériaux utilisables a augmenté leurs indications ces dernières années. A l'inverse des deux techniques précédentes, la poudre de polymère est ici remplacée par du métal, fréquemment du cobalt chrome.

Avant de vouloir entreprendre l'impression d'une pièce il faut auparavant réaliser sa conception sur un logiciel adapté (3shape[®], Dentalwings[®], Exocad[®]...). Cela implique en amont la numérisation de l'empreinte dentaire, soit directement en bouche grâce aux systèmes d'empreinte optique, soit grâce à des scanners extra oraux permettant de scanner directement les empreintes ou les modèles une fois coulés. On notera aussi qu'on ne se passe pas de modèles dentaires, en effet ils peuvent servir de support d'impression, de présentation de la pièce au patient, et pour contrôler l'adaptation de la prothèse et la concordance entre l'empreinte ayant permis de réaliser la pièce et la réalité clinique.

V) 1. Fabrication de modèles calcinables pour coulée en technique de cire perdue par multi jet modeling ou stéréolithographie.

Classiquement, la technique de coulée à la cire perdue est un procédé de moulage à partir d'une sculpture originale en cire. Ici on ne parlera plus de sculpture comme c'était le cas pour les réalisations manuelles des prothésistes mais de maquettes. Ces dernières peuvent être en cire mais sont plus fréquemment en résine calcinable (plus simple à imprimer) Ces dernières sont réalisées sur ordinateur et imprimées directement sur le modèle dentaire qui sert de support. Le modèle peut être imprimé en même temps dans une matière différente non calcinable sur certaines imprimantes multi jet modeling.



Maquette d'un châssis de stellite en résine calcinable imprimée en 3D (www.digital-dental-cadcam-cfao.fr)

La réalisation suit ensuite le procédé classique de coulée à la cire perdue, comme une armature sculptée. En dehors des stellites, cette méthode est utilisée pour la réalisation de chapes pour couronnes et bridges. Cette technique est aussi exploitable dans les méthodes de pressée de la céramique nécessitant une maquette calcinable, ce qui en fait la méthode la plus polyvalente^[27].

V) 2. Fabrication d'armatures pour prothèse adjointes et des châssis de prothèses conjointes par microfusion laser

La fabrication directe par frittage laser (microfusion de poudre, majoritairement du cobalt chrome) est certainement la technique de fabrication additive qui a le plus d'avenir pour la fabrication de châssis et armatures. Elle est en effet plus rapide et plus rentable que le procédé de fonderie ou d'usinage, et est parfaitement adaptée à la production de masse personnalisée. La modélisation 3D du châssis est directement matérialisée dans sa matière définitive en chrome cobalt. La manutention demandée pour la finition se limite à un traitement thermique et à la découpe des tiges supports, puis un simple polissage.



Stellite imprimé directement en 3D par le laboratoire Tecknodent (www.i1os.com)

Pour ce qui est de la prothèse fixée, la fabrication de chape par technique SLM est aussi possible. Cette méthode a l'avantage d'assurer une parfaite homogénéité de l'alliage ainsi qu'une densité élevée, deux éléments très favorables à la fiabilité d'un éventuel revêtement céramique, ou au vieillissement en bouche d'une couronne uniquement constituée d'acier. Pour finir, il existe désormais des méthodes fiables de numérisation des ancrages radiculaires^[28]. Ces dernières sont particulièrement appropriées pour la réalisation extrêmement précise de tenons anatomiques, là où la coulabilité du métal impose des limites pouvant être dépassées par les méthodes d'impression 3D.

Qu'il s'agisse de la coulée d'une armature de prothèse adjointe, d'un châssis de prothèse conjointe, ou encore d'un inlay core, la pièce peut être directement imprimée, sans nécessité de coulée du modèle. En revanche pour des raisons d'ergonomie, de stockage et de présentation, il est très rare que l'empreinte ne soit pas coulée en plâtre ou numérisée puis imprimée elle aussi pour servir de support à la pièce produite.

V) 3. Les nombreuses possibilités offertes par la résine et la méthode stéréolithographique

Les différentes variétés de résine mises au point et l'ancienneté de la technique stéréolithographique font de cette technique celle offrant le plus grand nombre de possibilités. La plus connue et la plus répandue est l'utilisation de guide chirurgicaux en implantologie. Mais

récemment, avec la démocratisation de l'impression 3D, certains logiciels offrent la possibilité au praticien de récupérer le fichier source afin qu'il imprime lui-même sa gouttière ou auprès d'un sous-traitant. Une autre technique consiste à imprimer une version modifiée des moulages, sur laquelle on aura placée des tiges correspondant aux axes de forages définis lors de l'étude pré implantaire. Cela simplifiera la réalisation "plus classique" du guide, par application d'une résine sur le modèle après ajout de canons de perçage en regard des axes matérialisés au préalable. Les avantages de la chirurgie guidée sont nombreux et bien connus (précision grandement accrue, invasivité réduite de la chirurgie, confort opératoire...). La résine la plus souvent utilisée pour les guides imprimés est d'une grande résistance chimique, permettant nettoyage, désinfection et décontamination à froid sans variation dimensionnelle ni altération. Ceci contrebalance le fait que ces guides en PLA (Acide Polylactique) ou en ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) ne sont pas autoclavable. En revanche, certains modèles moins courant d'imprimantes 3D permettent d'imprimer du PEEK (Polyétheréthercétone), un thermoplastique plus onéreux autoclavable.



Guide chirurgical implantaire imprimé en 3D par stéréolithographie (www.stratasys.com)

L'usage d'impression 3D par méthode stéréolithographique est aussi répandue en orthodontie pour l'impression de gouttières. On a pour cela recours aux set-ups numériques. Cela consiste à récupérer les modèles numérisés des arcades dentaires et à planifier informatiquement, grâce à un logiciel, le traitement orthodontique. Une fois le déplacement virtuel des dents fait, les modèles des arcades dentaires à différentes étapes sont imprimés. Sur ces modèles seront réalisés des gouttières transparentes qui auront pour rôle d'aligner les dents tel que prévu informatiquement. Ce type de traitement a initialement été proposé par la société Invisalign. Ici la résine utilisée bénéficie d'une certification supplémentaire par rapport à celle des guides chirurgicaux, pour une utilisation en bouche supérieur à 24h (norme iso 10993-1). Sur le set-up numérique, il est possible

également de modéliser des boîtiers individualisés. Ces boîtiers (pouvant être réalisés après mise en revêtement ou par frittage laser) sont utilisés pour l'orthodontie linguale. Afin de les placer de manière précise, une gouttière de transfert est la plupart du temps réalisée par stéréolithographie et permet d'assurer le collage^[29].



Gouttière orthodontique imprimée en 3D (3dnatives.com)

Outre ces deux exemples, il demeure de nombreuses autres possibilités permises par l'impression 3D stéréolithographique. On peut par exemple créer un guide occlusal sur le montage directeur en prothèse fixée. Si la position de référence occlusale doit être modifiée, afin d'évaluer l'acceptation par le patient de cette nouvelle position, une phase de temporisation est à intégrer au plan de traitement. Celle-ci passe par la réalisation de prothèses de type overlay provisoire. On peut désormais évaluer cette nouvelle position numériquement. On apporte les modifications sur les modèles numérisés grâce à un logiciel de CAO (wax-up numérique). Par la suite on peut soit réaliser un isomoulage classique en imprimant le modèle "corrigé" et en faisant une clé en silicone, soit imprimer une gouttière transparente réalisée numériquement, avec des espaces en regard des zones où du volume doit être ajouté. De même, toujours pour rechercher une nouvelle position de référence occlusale ou pour traiter les cas de bruxisme, la mise en place d'une gouttière peut être nécessaire. Au lieu d'être thermoformée ou réalisée par un mélange poudre/liquide de résine, elle peut maintenant être imprimée. Cela à l'avantage par rapport aux techniques d'usinage d'être plus économique en matière première. On peut également envisager l'impression 3D de porte empreintes individuel.



*Porte empreinte individuel imprimé en 3D par le laboratoire Bego, à Villeurbanne
(www.france.bego.com)*

VI) Conclusion

L'impression 3D est un processus de fabrication additive, à différencier des techniques soustractives comme l'usinage. Actuellement, les usineuses sont encore les machines outils les plus utilisées pour la fabrication d'éléments prothétique, et demeurent de manière générale plus aptes à faire face aux contraintes de résistance, biocompatibilité et variété des matériaux. Mais l'essor récent de l'impression 3D et l'engouement entraîné par cette technologie et les possibilités qu'elle offre ont fait que depuis quelques années certains systèmes d'impression 3D permettent également d'atteindre ces objectifs. Beaucoup d'imprimantes professionnelles ont désormais une précision de l'ordre de quelques microns. Ce développement est permis par les avancées qu'apporte cette technologie, notamment en terme de réduction des quantités de matière première utilisée, de raccourcissement des étapes de production et de simplification des étapes de finition des pièces. On ne parle pas là d'une technologie futuriste. A l'heure actuelle plusieurs laboratoires de prothèse dentaire lyonnais travaillent déjà avec l'entreprise internationale Bego, dont une antenne est implantée à Villeurbanne. Cette dernière, jouissant d'une excellente renommée dans le secteur dentaire dans lequel elle s'est spécialisée, propose aux prothésistes une offre croissante d'impression 3D pour stellite, maquettes calcinables, portes empreintes individuels, chapes pour couronnes et bridges, gouttières occlusales... Les prothésistes sont de plus en plus nombreux à être équipés de matériel de numérisation, et le savoir faire manuel se voit maintenant complété d'un savoir faire digital, ces derniers assurant le scan du modèle et l'ajustage informatique de la pièce, avant de transmettre ces données à l'entreprise réalisant la production des pièces.

Si l'on prend en compte l'amélioration récente des techniques de prise d'empreinte optiques, le fait que la recherche et développement dans le domaine de l'impression 3D n'a jamais été aussi active, que la gamme de matériaux proposée est déjà vaste mais va encore s'étendre avec des projets d'impression de céramique (pour répondre à l'industrie médical et l'aéronautique), l'impression 3D a encore un bel avenir devant elle. Loin d'être un effet de mode, cette technique de fabrication deviendra progressivement incontournable à toutes les étapes de la réalisation prothétique.

VII) Bibliographie

1 Charles Hull. Apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography. United States Patent N°4575330. 11 Mars 1988.

<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US4575330.pdf>

2 Dr. Phil Reeves. Putting 3d printing into the value stream. The econolyst. Octobre 2012.

3 Claudia Duschek. Des médecins implantent une mandibule personnalisée en 3D. Dental Tribune. Mars 2012

4 Keith Krause. Small arms survey 2015 : Weapons and the world. Cambridge, Royaume Uni : Cambridge University Press, 2015. 287p

5 David Derausseaux. BMW teste l'impression 3D. Shapelize. 10 Juin 2014.

6 D. T Pham et R. S Gault. A comparison of rapid prototyping technologies. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998; volume 38: pages 1149 à 1418.

7 David Larousserie. Le versant sombre des imprimantes 3D. Le monde. 26 Août 2013.

8 Brent Stephens, Parham Azimi, Zeineb El Orch, Tiffanie Ramos. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. 6 Mai 2015.

9 Envision TEC GmbH. 3Shape Test Case | 3Dent™. 27 Février 2015.

10 Peter Petrochenko. Laser 3D printing with Nanoscale Resolution: Improving Biocompatibility and Mitigating Toxicity from Photoinitiators. 2015

11 Vincent Aignier. 3D-Printer with Nano-Precision, Ultra-high-resolution 3D Printer Breaks Speed-Records at Vienna University of Technology. Technische Universität Wien. 12 Mars 2012.

12 AnVi OpenSource Knowledge Trust. An overview on 3D printing. 2015. 117 pages.

13 Arcam AB. Arcam Q20 Technical Data. Arcam Q20. Novembre 2013.

- 14 National Aeronautics and Space Administration. Space Tools On Demand: 3D Printing in Zero G. NasaFacts. 24 Avril 2014
- 15 Samuel N. Bernier, Bertier Luyt, Tatiana Reinhard. Design for 3D Printing : Scanning, Creating, Editing, Remixing, and Making in Three Dimensions. Maker Media, 2015. 160 pages.
- 16 Mathilde Berchon. L'impression 3D 2ème édition. Eyrolles, 2014. 214 pages.
- 17 S. Scott Crump. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. United States Patent N°5121329 A. 9 Juin 1992.
<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US5121329.pdf>
- 18 Chee Kai Chua, Wai Yee Yeong. Bioprinting: Principles and Applications. World Scientific Publishing Company, 2015. 296 pages.
- 19 Bertier Luyt. Impression 3D pas à pas. Marabout, 2014. 160 pages.
- 20 Marc Gozlan. L'impression 3D repousse les limites de la chirurgie. Sciences et Avenir n°826. 26 Novembre 2015.
- 21 Ghislaine Bertrand, Valérie Flipo. L'impression 3D au service des chirurgiens ORL : une première à Toulouse. Communiqué de presse régional du CNRS. 16 Mars 2016.
- 22 University Medical Center Utrecht. 3D-printed skull implanted in patient. 27 Mars 2014.
- 23 David A. Zopf, Scott J. Hollister, Marc E. Nelson, Richard G. Ohye, Glenn E. Green. et coll. Bioresorbable Airway Splint Created with a Three-Dimensional Printer. The new England journal of Medecine. 23 Mai 2013.
- 24 Rhiannon Williams. The next step: 3D printing the human body. The Telegraph. 16 Mai 2014.
- 25 Scott Smith. Coming Soon to a 3-D Printer near You : Human Tissue and Organs. Quartz. 30 Avril 2013.
- 26 Jeremy Hsu. 3D-Printed Kidneys Take Small Steps Toward Organ Replacements. Livescience. 25 Novembre 2013.

27 Centre national de formation des prothésistes dentaires. Le guide de la CFAO dentaire. 2009. 70 pages.

28 Dr JAISSON Maxime. Impression 3D : La nouvelle mode en chirurgie dentaire ?. Dental Tribune. Mars 2015.

29 Jeryl D. English, Sercan Akyalcin, Timo Peltomaki, Kate Litschel. Mosby's Orthodontic Review. Mosby, 2014. 368 pages.

CEYTE Samuel - L'impression 3D : Fonctionnement et perspectives en chirurgie dentaire

(Thèse : Chir. Dent. : Lyon : 2016.027)

N ° 2016 LYO 1D 027

L'impression 3D, bien qu'ancienne, est une technologie qui s'est récemment popularisée. Cette technique de fabrication additive revêt de multiples formes. Qu'il s'agisse de stéréolithographie, de frittage laser ou encore de dépôt de filament fondu, les différentes méthodes d'impression 3D présentent chacune leurs matériaux de prédilection, leurs avantages et leurs inconvénients. L'amélioration progressive de ces méthodes a permis d'atteindre des niveaux suffisamment élevés de biocompatibilité, de résistance et de précision pour autoriser leur emploi par l'industrie médicale. La chirurgie dentaire est aussi touchée par cette innovation. Il s'agit tout comme la médecine d'un domaine rapidement évolutif, résolument tourné vers l'amélioration technologique. L'intégration de l'impression 3D à la chaîne de fabrication prothétique n'est en fait que la suite logique de l'adoption progressive de la numérisation et de la conception et fabrication assistée par ordinateur. Avec l'amélioration récente des techniques de prise d'empreinte optiques, et le fait que la recherche et développement dans le domaine de l'impression 3D n'ai jamais été aussi active, on peut affirmer que l'impression 3D a un bel avenir devant elle. Loin d'être un effet de mode, elle deviendra progressivement incontournable à toutes les étapes de la réalisation prothétique.

Rubrique de classement :

INSTRUMENTATION

Mots clés :

- Impression 3D
- Stéréolithographie
- Frittage laser
- Multi-jet modeling
- Prothèse
- Fabrication additive

Mots clés en anglais :

- 3D printing
- Stereolithography
- Laser sintering
- Multi-jet modeling
- Prosthesis
- Additive manufacturing

Jury :

Président :
Assesseurs :

Pr Denis BOURGEOIS
Dr Laurent VENET
Dr Jean-Pierre DUPREZ
Dr Thomas FORTIN

Adresse de l'auteur :

CEYTE Samuel
1800 Route de Seytenas
07 290 QUINTENAS