

NEMESIS

Negative Effects in Medical Sciences Oral and Maxillofacial Surgery

UCL PRESSES  
UNIVERSITAIRES  
DE LOUVAIN



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10

## Imprimantes tridimensionnelles grand public compatibles avec la dentisterie ?

---

Auteurs:

François G, DDS<sup>1,\*</sup>,  
Henriquet N, DDS<sup>2</sup>,  
Xu BZ, DDS<sup>3</sup>

11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20

### Affiliations:

<sup>1</sup> Pratique privée, GAMEDENT, Rue Gameda 11/2, 5100, Jambes, Belgique

<sup>2</sup> Pratique privée, Rue de Renaumont 40, 6880, Bertrix, Belgique

<sup>3</sup> Pratique privée, Av. du Roi Albert 124, 5590, Ciney, Belgique

\*Auteur correspondant: François G, Rue Gameda 11/2, 5100, Jambes, Belgique,  
[guillaume.francois@outlook.com](mailto:guillaume.francois@outlook.com), ORCID ID: 0000-0002-5005-6948

Disclaimer: the views expressed in the submitted article are our own and not an official position of the institution or funder.

21

## Résumé

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

L'objectif de ce travail est de définir les différents critères qu'un dentiste généraliste doit prendre en compte pour s'équiper d'une imprimante tridimensionnelle (3D) à usage dentaire. Nous avons recensé au total 1037 imprimantes 3D produites par 342 entreprises et 211 imprimantes 3D de 88 entreprises pouvant imprimer avec des couches de 25 $\mu$ m. Pour pouvoir les comparer nous avons évalué 16 caractéristiques différentes: 1) famille de procédé d'impression 3D, 2) épaisseur de couche minimale, 3) présence ou non d'étude scientifique de validation de l'épaisseur de couche minimale, 4) résolution XY minimale, 5) type de calibrage, 6) environnement d'impression, 7) présence d'un plateau d'impression chauffant, 8) vitesse d'impression maximale (en mm/s) avec un lien donnant le détail de l'épaisseur de couche utilisée, de la résolution XY utilisée et du matériau utilisé pour déterminer cette vitesse, 9) dimensions de capacité d'impression, 10) capacité d'utiliser des matériaux ne provenant pas de l'entreprise constructrice, 11) capacité d'utiliser des matériaux biocompatibles, 12) poids (en kg) et dimensions de l'imprimante (en cm), 13) systèmes d'exploitation compatibles, 14) types de fichier d'impression 3D compatibles, 15) gestion du service après-vente et durée de la garantie, 16) prix, en indiquant si les taxes sont incluses ou non. Nous avons constaté une grande hétérogénéité des informations présentes et des informations souvent absentes en ce qui concerne : 1) le type de calibrage, 2) la vitesse d'impression, 3) le prix, 4) le service après-vente, 5) la garantie ainsi que 6) les matériaux qui sont pris en compte par l'imprimante 3D. Nous avons décrit des difficultés de communication multiples avec nos interlocuteurs et un développement très dynamique du monde d'impression 3D. Enfin, nous avons proposé des caractéristiques d'une imprimante 3D dentaire « idéale » et d'une entreprise-partenaire « idéale » pour un dentiste désireux de se procurer l'imprimante 3D de son choix.

**Mots-clés:** imprimante 3D, impression 3D, dentisterie

50

## Abstract

51

52

53

54

55

56

57

58

59

The objective of this work was to define the different criteria that a general dentist will have to take into account to equip himself with a three-dimensional (3D) printer for dental use. We have identified a total of 1037 3D printers produced by 342 companies and 211 3D printers from 88 companies that can print with 25 $\mu$ m layers. To be able to compare them, we evaluated 16 different characteristics: 1) family of 3D printing process, 2) minimum layer thickness, 3) presence or absence of scientific study to validate the minimum layer thickness, 4) minimal resolution on XY axes, 5) type of calibration, 6) printing environment, 7) presence of a heated printing plate, 8) maximum printing speed (in mm/s) with a link giving details of the layer thick-

60 ness used, the XY resolution used and the material used to determine this speed, 9)  
61 dimensions of printing capacity, 10) capacity to use materials not originating from  
62 the manufacturer, 11) capacity to use biocompatible materials, 12) weight (in kg)  
63 and printer dimensions (in cm), 13) compatible operating systems, 14) compatible  
64 3D print file types, 15) after-sales service and warranty period, 16) price, including  
65 whether taxes are included s or not. We noted a great heterogeneity of the infor-  
66 mation present, and information often absent regarding: 1) the type of calibration, 2)  
67 the printing speed, 3) the price, 4) the after-sales service, 5) the guarantee as well as  
68 6) the materials which are taken into account by the 3D printer. We described multi-  
69 ple communication difficulties with our contacts and a very dynamic development  
70 of the 3D printing world. Finally, we proposed the characteristics of an "ideal" den-  
71 tal 3D printer and of an "ideal" partner company for a dentist wishing to obtain the  
72 3D printer of his choice.

73  
74  
75

**Keywords:** 3D printing, 3D printers, dentistry

76

77

## Introduction

78 L'impression tridimensionnelle (3D) se caractérise par une fabrication additive, en  
79 empilant la matière couche par couche, à l'inverse de l'usinage, qui produit des  
80 pièces par soustraction de matière. En août 1984 a été déposé aux Etats-Unis le  
81 brevet sur la technique d'impression 3D par stéréolithographie, le StereoLithography  
82 Apparatus (SLA) [1]. Cette technologie laser utilise une résine liquide sensible aux  
83 ultraviolets (UV). Un faisceau laser UV balaye la résine et la durcit sur une  
84 section définie et crée un objet en trois dimensions, couche par couche. L'avènement  
85 de SLA a marqué les débuts commerciaux de l'impression 3D avec la création de  
86 l'entreprise 3D Systems en 1986 qui est la principale entreprise actuelle de  
87 l'impression 3D au niveau mondial. La première imprimante 3D est lancée en 1988.  
88 La technologie SLS-Sintering Laser System ou procédé de frittage laser sélectif, a  
89 été découverte par la société DTM Corp en 1986 (et rachetée par 3D Systems en  
90 2001) [2]. La société Stratasys a commercialisée en 1989 une nouvelle technologie  
91 FDM-Fused Deposition Modeling, ou dépôt de fil fondu. Ce procédé d'impression  
92 3D utilise un filament qui est chauffé et déposé, couche par couche, sur un plateau à  
93 l'aide d'une buse d'impression chauffée. Entre chaque couche, le plateau  
94 d'impression descend afin de permettre la production de la couche suivante. Ce  
95 procédé est répété jusqu'à obtention du produit 3D fini. Cette technique est  
96 actuellement utilisée par la majorité des imprimantes 3D dites grand-public [3]. Le  
97 terme « FDM » appartenant à Stratasys, les autres entreprises constructrices utilisent  
98 pour la même technologie l'appellation FFF-Fused Filament Fabrication. En 1995  
99 est apparu la technologie DMLS-Direct Metal Laser Sintering ou frittage laser de  
100 métal. Ce procédé d'impression 3D utilise un laser pour chauffer de fines particules  
101 de plastique, de métal, de céramique ou de verre. L'imprimante 3D dépose une fine  
102 couche de particules dans le bac d'impression. Cette couche est chauffée par le laser  
103 afin de former une couche de l'objet. Ensuite, le bac d'impression descend afin de  
104 permettre la production de la couche suivante. Ce procédé est répété jusqu'à  
105 l'obtention du produit 3D fini. Cette technologie est similaire au SLS, mais a été  
106 adapté aux métaux. Une nouvelle technologie 3D de fabrication additive pour  
107 métaux a été mise au point en 1997 par la firme suédoise Arcam, EBM-Electron  
108 Beam Melting. En 1998 la firme israélienne Objet a mis au point la technique  
109 Polyjet. Ce procédé consiste à projeter des gouttelettes de matériaux (des  
110 photopolymères) en de très fines couches sur un plateau d'impression. A l'instant  
111 même où la couche de gouttelettes est projetée, elle est solidifiée par une lumière  
112 UV. Le matériau de support est un gel nettoyable à l'eau. La firme Objet fut  
113 rachetée par Stratasys en 2011. En 2003, la société MCor technologies a  
114 commercialisé une nouvelle technologie dite 3DPP-3D Paper Printing. Ce procédé  
115 utilise des feuilles de papier de format A4 qui sont découpées, couche par couche, et  
116 les feuilles sont collées les unes aux autres avec une pression de 1 tonne [4-6]. La

117 société ZCorporation a commercialisé la première imprimante 3D couleur en 2005.  
118 Elle fonctionne sur le même principe que les imprimantes 2D couleur. La  
119 technologie a été rebaptisée CJP-Color Jet Printing après le rachat de ZCorp par 3D  
120 Systems. Durant l'année 2004 est né le projet RepRap initié par Dr. Bowyer de  
121 l'université de Bath [7]. Son but était de créer une imprimante 3D capable de se  
122 répliquer en imprimant en 3D la majorité des pièces nécessaires à son propre  
123 fonctionnement. Le projet visait à créer des machines accessibles économiquement  
124 et techniquement aux particuliers, et utilisait des logiciels de commande de  
125 l'imprimante 3D de type «Open Source». La première imprimante 3D auto-  
126 répliquante (Darwin) est sortie en 2008. En 2009, le courant DIY-Do It Yourself s'est  
127 propagé à l'impression 3D avec la sortie de l'imprimante 3D en pièces détachées: la  
128 CupCake, par l'entreprise MakerBots (entreprise ensuite rachetée par Stratasys). Au  
129 début de l'année 2015, Hewlett Packard a proposé une nouvelle technologie  
130 d'impression 3D appelée MJP-Multi Jet Fusion [8]. Ce  
131 procédé utilise une couche de poudre mais sans avoir recours à un laser pour la  
132 chauffer. Au début du procédé, le lit de poudre est chauffé de manière uniforme puis  
133 un agent de fusion est projeté sur l'entièreté de la surface ainsi qu'un agent détaillant  
134 au niveau des contours pour améliorer la résolution du produit fini. Toujours en  
135 2015, la société Carbon3D a dévoilé la technologie CLIP-Continuous Liquid  
136 Interphase Printing. Ce procédé se rapproche de la stéréolithographie [9] mais  
137 diminue fortement la durée de fabrication. Une lentille de contact permet de  
138 contrôler le niveau d'oxygène présent lors de la réaction chimique au niveau de la  
139 transformation de la résine liquide vers la phase solide.  
140 L'impression 3D a commencée à intéresser le grand public à partir des années 2004-  
141 2007, suite aux projets RepRap et Fab@home. De plus, le brevet sur la technologie  
142 FDM a expiré en 2009 [3], ce qui a provoqué une démultiplication des projets  
143 « open source » entraînant, en quelques années, une chute du coût des imprimantes  
144 3D utilisant cette technologie. Une autre technologie importante est aussi tombée  
145 dans le domaine public en 2014, la technologie SLS [2]. Cette technologie est  
146 beaucoup plus onéreuse et plus complexe à développer pour le grand public que la  
147 technologie FDM. Les chutes de brevets dans le domaine public et les projets  
148 coopératifs ne sont pas les seules raisons qui entraînent un boom de l'impression 3D  
149 à destination des particuliers. Le financement participatif ou le crowdfunding y  
150 contribue également. Le crowdfunding est une expression qui caractérise toutes les  
151 méthodes de transactions financières faisant appel à un grand nombre de personnes  
152 privées pour permettre le financement d'un projet sans passer par l'intermédiaire  
153 d'un acteur traditionnel de financement comme une banque. Le crowdfunding  
154 permet à un inventeur de devenir un entrepreneur sans devoir vendre sa technologie  
155 à un industriel, ce qui facilite l'innovation, la production mais aussi les dérives liés à  
156 l'impression 3D grand-public.  
157 L'objectif de notre travail de recherche est de définir les différents critères qu'un  
158 dentiste généraliste doit prendre en compte s'il/elle souhaite équiper son cabinet  
159 dentaire d'une imprimante 3D grand public.

160

## Matériel et méthodes

161 Pour débiter notre travail de recherche, nous avons dû établir une liste de toutes les  
162 imprimantes 3D grand-public présentes sur le marché mondial et disponibles à la  
163 vente jusqu'au 28 février 2017. Pour créer cette liste, nous avons utilisé deux sites  
164 Internet de référencement d'imprimantes 3D. Le premier site, 3Dnatives  
165 ([www.3dnatives.com/3D-compare](http://www.3dnatives.com/3D-compare)), recensait plus de 200 imprimantes 3D. Cette  
166 première base de données a été reportée dans un tableau type « Excel ». En  
167 approfondissant nos recherches, nous avons pris connaissance d'un autre site  
168 anglophone beaucoup plus complet ([www.3dprintingdatabase.org/fr/3dprinter](http://www.3dprintingdatabase.org/fr/3dprinter)). Le 3D  
169 Printing Data Base recensait en fin février 2017 un millier d'imprimantes 3D. Nous  
170 avons complété ces deux sites avec une recherche manuelle, par trois observateurs,  
171 des imprimantes 3D à usage dentaire. A la fin de notre recensement nous sommes  
172 arrivés à un total de 1037 imprimantes produites par 342 entreprises. Pour chaque  
173 imprimante 3D présente dans notre tableau, une recherche sur le site Internet du  
174 constructeur a été ensuite effectuée afin de répertorier toutes les imprimantes 3D  
175 mises en vente par la même société.

176 Nous avons décidé ensuite de nous concentrer sur les imprimantes 3D capables  
177 d'imprimer avec une épaisseur de couche de maximum 25 microns ( $\mu\text{m}$ ) (Filtre I).  
178 Cette exigence a réduit notre recherche à 211 imprimantes produites par 87 sociétés.  
179 Cette valeur d'épaisseur de couche a été déterminée sur base d'une recherche dans la  
180 littérature scientifique dentaire (plus précisément sur les articles se rapportant aux  
181 joints dento-prothétiques, implanto-prothétiques et à la prothèse fixe) [10]. Cette  
182 épaisseur a aussi été choisie car elle permet d'imprimer en 3D du matériel dentaire  
183 au rendu lisse sans nécessité de post-traitement, car celui-ci risquerait de diminuer la  
184 précision de l'impression 3D.

185 Afin de poursuivre notre évaluation, nous avons décidé de créer une liste de 16  
186 caractéristiques qui semblaient les plus pertinentes pour un dentiste généraliste  
187 souhaitant acquérir une imprimante 3D.

Nous avons retenu:

- 188 1. Type de technologie d'impression 3D,
- 189 2. Matières premières utilisées pour l'impression 3D: exclusivement celles de  
190 l'entreprise ou indépendantes de l'entreprise constructrice (dites  
191 « ouvertes »),
- 192 3. Capacité d'utiliser des matières premières biocompatibles,
- 193 4. Système(s) informatique d'exploitation compatible(s),
- 194 5. Format(s) de fichier compatible(s),
- 195 6. Vitesse d'impression (maximale),
- 196 7. Domaines d'utilisation,
- 197 8. Dimensions de l'imprimante 3D,
- 198 9. Dimensions du plateau d'impression,
- 199 10. Type de calibrage du plateau d'impression,
- 200 11. Imprimante 3D à environnement d'impression ouvert ou fermé  
201 (propriétaire),
- 202 12. Poids de l'imprimante 3D,

- 203 13. Prix de l'imprimante 3D,  
204 14. Pays d'implantation de la société constructrice,  
205 15. Service après-vente,  
206 16. Pour la technologie FDM: présence d'un plateau d'impression chauffant ou  
207 non.

208 Tous les critères n'étant pas facilement accessibles sur les sites officiels, nous avons  
209 envoyé un e-mail « type » (Figure 1) à l'adresse ou aux adresses e-mail référencée(s)  
210 sur le site constructeur ou alors, nous avons rempli un formulaire de contact  
211 directement sur le site avec le même texte que l'e-mail « type ».  
212 Nous avons créé une adresse e-mail factice au nom d'un cabinet dentaire bruxellois  
213 fictif. Pour donner plus de crédibilité à notre cabinet, nous avons créé une page  
214 Facebook ainsi qu'un compte Twitter. Ces deux moyens de communication ont été  
215 utilisés en dernier recours lorsque le constructeur n'avait ni adresse e-mail valide ni  
216 fiche de contact sur son site (Figure 1).

217  
218 **Fig 1. Email au constructeur (Anglais/Français)**  
219

Dear Sir or Madam,

Let me first introduce myself, I am a dental surgeon and I would like to get into the field of 3D printers. I strongly believe that 3D printers are the future of modern dentistry and would be very interested to try out this new technology.

Your product (XXXXX) have caught my attention and I would like to hear more about them. In particular, could you tell me the specifications of:

- Your printing technology
- Your build plate leveling
- The supported materials
- The software, the supported OS
- The minimal layer height that your 3D printer can reach
- The build speed
- The XYZ axis accuracy
- And I also would like to know if you offer an after-sales service.

I thank you in advance for your kind attention and look forward to hearing from you.

Yours sincerely,

---

Chèr(e) Madame, Monsieur,

Permettez- moi de me présenter, je suis un chirurgien dentiste et j'aimerais me lancer dans le domaine des imprimantes 3D. Je crois sincèrement que les imprimantes 3D sont le futur de la dentisterie moderne et c'est pour cette raison que je suis intéressé d'essayer cette nouvelle technologie.

Votre produit (XXXXX) me parait clairement intéressant et j'aimerais en apprendre un peu plus. En particulier, pourriez-vous m'en dire plus sur ces spécifications:

- La technologie utilisée par votre imprimante
- Le calibrage de votre plateau
- Les matériaux utilisables

- Le logiciel, le système d'exploitation
- La plus petite épaisseur de couche atteignable par votre imprimante
- La vitesse d'impression
- La précision sur les axe XYZ

J'aimerais aussi savoir si vous m'assurez un service après-vente.

Je vous remercie d'avance pour votre réponse.

Cordialement,

G François

HFX Dental Clinic - Brussels

[hfx-dental-clinic@outlook.com](mailto:hfx-dental-clinic@outlook.com)

220 Nous nous sommes faits passer pour un dentiste généraliste cherchant des  
 221 informations simples sur une ou plusieurs imprimantes 3D vendues par l'entreprise.  
 222 Cet e-mail avait pour but de compléter notre tableau et de nous renseigner sur le  
 223 niveau de connaissance de notre interlocuteur et sur la rapidité de la communication.  
 224 Nous avons choisi de laisser un mois aux entreprises constructrices pour nous  
 225 contacter.  
 226 Ensuite nous avons envoyé un e-mail « type » de relance (Figure 2) aux entreprises  
 227 qui ne nous avaient pas répondu. Nous avons choisi d'exclure les entreprises n'ayant  
 228 soit pas répondu à notre relance, soit répondu dans un délai supérieur à trente jours,  
 229 soit n'ayant répondu que par Twitter ou par Facebook (Filtre II).

230

231

232

**Fig. 2.** E-mail de relance Exemple-type d'email de relance auprès des entreprises.

Dear Sir or Madam,

Recently, I sent to you an email requesting you some information about your 3D Printer. But I am very disappointed to notice that you did not answer me. Perhaps that is just an oversight and I am hoping that it is. So I am sending you again my request and I hope to hear from you soon.

Request from March 18th:

*« Dear Sir or Madam,*

*Let me first introduce myself, I am a dental surgeon and I would like to get into the field of 3D printers. I strongly believe that 3D printers are the future of modern dentistry and would be very interested to try out this new technology.*

*Your product (XXXX) have caught my attention and I would like to hear more about them. In particular, could you tell me the specifications of*

*\* Your printing technology*

*\* Your build plate leveling*

*\* The supported materials*

*\* The software, the supported OS*

*\* The minimal layer height that your 3D printer can reach*

*\* The build speed*

*\* The XYZ axis accuracy*



*And I also would like to know if you offer an after-sales service.  
I thank you in advance for your kind attention and look forward to hearing from you.  
Yours sincerely, »*

Madame, Monsieur,

Je vous ai envoyé récemment un email demandant des informations à propos de votre imprimante 3D. Mais j'ai été très déçu de constater que vous ne m'avez pas répondu. Il s'agit probablement d'un oubli de votre part, ce du moins, je l'espère. C'est pourquoi, je vous renvoie une nouvelle fois ma demande et j'espère avoir de vos nouvelles très prochainement.

Demande du 18 Mars:

*« Chèr(e) Madame, Monsieur,  
Permettez- moi de me présenter, je suis un chirurgien dentiste et j'aimerais me lancer dans le domaine des imprimantes 3D. Je crois sincèrement que les imprimantes 3D sont le futur de la dentisterie moderne et c'est pour cette raison que je suis intéressé d'essayer cette nouvelle technologie.  
Votre produit (XXXX) me parait clairement intéressant et j'aimerais en apprendre un peu plus. En particulier, pourriez-vous m'en dire plus sur ces spécifications:  
- La technologie utilisée par votre imprimante  
- Le calibrage de votre plateau  
- Les matériaux utilisables  
- Le logiciel, le système d'exploitation  
- La plus petite épaisseur de couche atteignable par votre imprimante  
- La vitesse d'impression  
- La précision sur les axe XYZ  
J'aimerais aussi savoir si vous m'assurez un service après-vente.  
Je vous remercie d'avance pour votre réponse.  
Cordialement, »*

G François  
HFX Dental Clinic - Brussels  
[hfx-dental-clinic@outlook.com](mailto:hfx-dental-clinic@outlook.com)

233  
234  
235  
236  
237

Ce nouveau critère nous a laissé en présence de 155 imprimantes et 53 entreprises constructrices.  
Dès que nous recevons des réponses à nos e-mails, nous reportons ces informations dans notre tableau Excell mais avec une couleur différente (rouge) afin de les

238 différencier de celles recueillies sur leur site web. Ces deux sources nous ont permis  
239 de croiser les informations reçues et de voir si notre contact était fiable.  
240 Les imprimantes 3D vendues sous forme de kit à monter soi-même ont été exclues  
241 de notre tableau car nous avons considéré qu'un dentiste n'a ni le temps ni les  
242 connaissances pour assembler lui-même sa machine correctement (Filtre III).  
243 Cela nous a amené à 149 imprimantes produites par 50 entreprises.  
244 Ensuite, nous nous sommes intéressés au contenu des e-mails reçus et nous avons  
245 exclu les imprimantes 3D inadaptées, selon notre interlocuteur, à la dentisterie ou  
246 incapables d'imprimer sans artefact à 25µm, ainsi que les entreprises qui ont cessé  
247 de communiquer avec nous à ce stade de la discussion (Filtre IV).

248 Les raisons pour lesquelles nous avons supprimé les imprimantes suivantes sont  
249 présentées ci-dessous:

- 250
- 251 • CEL: d'après notre interlocuteur, une impression à 25µm avec leur  
252 imprimante 3D donnerait des défauts.
- 253 • Digital Wax Systems: Suppression des imprimantes 3D autres que celles  
254 faisant partie de la série D ou DFAB, car ce sont les deux seules séries  
255 compatibles avec la dentisterie.
- 256 • Leapfrog: Exclusion des imprimantes: Xcel, Creatr HS et Creatr HS XL,  
257 car selon notre interlocuteur, le seul modèle compatible avec la dentisterie  
258 est la Xeed.
- 259 • Minifactory: Selon notre interlocuteur, l'imprimante 3D n'est pas adaptée  
260 pour la dentisterie.
- 261 • ORD Solutions: Les modèles Dual et Single sont en rupture de stock et ne  
262 seront plus produits.
- 263 • Planmeca: L'interlocuteur nous a d'abord répondu mais a ensuite cessé de  
264 communiquer avec nous.
- 265 • Procoprint: L'interlocuteur nous a expliqué que la technologie FDM n'est  
266 pas adaptée à la dentisterie.
- 267 • Reify 3D: L'interlocuteur nous a expliqué que l'imprimante 3D n'est pas  
268 destinée à la dentisterie.
- 269 • Shining 3D: Pas encore de lancement international (entreprise chinoise).
- 270 • Sprinray: Interlocuteur (revendeur) n'a pas répondu à nos questions.
- 271 • TMTCTW: Interlocuteur ne nous a pas informé sur ses produits.

272 Cette étape nous a laissé avec 115 imprimantes produites par 43 entreprises  
273 constructrices.

274 Pour continuer d'affiner notre recherche, nous avons décidé d'envoyer un nouvel  
275 e-mail à nos contacts restants. Notre demande était très précise: nous voulions  
276 obtenir un échantillon gratuit d'un fichier « .stl » que nous avons choisi, produit par  
277 leurs imprimante 3D, avec une précision de 25µm au niveau de l'épaisseur de  
278 couche. Si cela n'était pas possible, une précision supérieure a été demandée. Cet

279 échantillon devait nous être envoyé avant janvier 2018. Lors de ce nouvel échange  
280 d'e-mails nous nous sommes rendu compte que certaines entreprises avaient déjà  
281 renouvelé leur gamme d'imprimantes 3D ce qui rendait notre tableau dépassé. Nous  
282 avons alors décidé, pour remettre notre liste à jour, de supprimer les imprimantes 3D  
283 que notre interlocuteur disait « sorties du catalogue » et d'ajouter les nouveaux  
284 modèles proposés. Ceci était réalisé seulement si notre interlocuteur nous parlait de  
285 sa nouvelle gamme d'imprimantes 3D. Cet échange d'e-mails nous a aussi permis de  
286 supprimer les imprimantes 3D que nos interlocuteurs ne trouvaient pas adaptées à la  
287 dentisterie.

288 Voici les raisons de leur suppression:

- 289 • Asiga: Renouvellement de la gamme, plus aucune imprimante 3D de notre  
290 tableau initial n'était encore en vente.
- 291 • Carima: Notre interlocuteur nous a dit que seul le modèle DS131 était  
292 adapté pour la dentisterie, donc nous n'avons conservé que celui-ci.
- 293 • Formslab: Le modèle 1+ n'est plus produit.
- 294 • Hyrel 3D: Nous n'avons conservé que le modèle EHR car notre  
295 interlocuteur nous a précisé que c'était le meilleur modèle pour la  
296 dentisterie.
- 297 • Leapfrog: Exclusion du modèle Xeed car il n'était plus produit.
- 298 • Lithroz: Le fabricant était en discussion avec l'entreprise Ivoclar car  
299 l'imprimante 3D a été réalisée en collaboration avec Ivoclar et donc pour  
300 l'instant imprimante 3D n'était pas disponible à la vente.
- 301 • Mass Portal: Nous avons gardé uniquement la gamme XD car c'est la seule  
302 à pouvoir utiliser des matériaux professionnels.
- 303 • IRA3D: Notre interlocuteur nous a signalé que l'entreprise a cessé  
304 d'exister.
- 305 • PhotoCentric 3D: Notre interlocuteur nous a expliqué que le modèle LCHR  
306 était suffisant pour notre domaine et donc nous avons exclu les autres  
307 modèles.
- 308 • RapidShape: La gamme dentaire n'était pas assez précise au niveau de  
309 l'épaisseur de couche et leur autres gammes ne sont pas adaptées à la  
310 dentisterie.
- 311 • Solidscape: Renouvellement de la gamme; Nous avons dû exclure les  
312 anciennes imprimantes 3D recensées et nous avons ajouté les modèles  
313 S350, S370 et 3Z Studio.
- 314 • Ultimaker: Notre interlocuteur nous a signalé que Ultimaker Original + est  
315 en kit (alors qu'il n'existait aucune indication qui nous le signalait sur le  
316 site) et donc ce modèle est à exclure. Par ailleurs, le modèle Ultimaker 2  
317 Go ne peut imprimer qu'en PLA, ce qui n'est pas approprié à notre  
318 demande selon l'interlocuteur.
- 319 • Volumic: Notre interlocuteur nous a expliqué que la meilleure imprimante  
320 3D pour notre secteur, d'après son expérience, est la Pro 20, nous avons  
321 donc exclu les autres modèles.

- 322 • Wanhao: Notre interlocuteur nous a expliqué que pour l'usage dentaire il  
323 faut choisir la Duplicator 7.

324 Malheureusement nous n'avons pas pu inclure la firme Sprinray et leur imprimante  
325 3D MoonRay car, malgré une réponse très complète de leur revendeur, celle-ci ne  
326 nous a été envoyée que le 22 janvier 2018, soit bien après le délai de réponse de 30  
327 jours que nous avions fixé. En effet, nous avons contacté Sprinray le 18 mars 2017.  
328 Avec cette remise à niveau de notre tableau nous sommes arrivés à 87 imprimantes  
329 produites par 39 entreprises constructrices.  
330 A ce stade de nos recherches nous n'avons pas toujours été directement en contact  
331 avec un membre de la firme productrice mais uniquement avec des revendeurs  
332 localisés dans notre région géographique.  
333 Une fois notre tableau remis à jour, nous avons éliminé les entreprises qui n'avaient  
334 ni répondu à l'e-mail demandant un échantillon gratuit ni à la relance que nous leur  
335 avons faite quelques semaines après (Filtre V). Ceci nous a donné un tableau  
336 comptant 82 imprimantes produites par 34 entreprises constructrices.

337 Pour continuer à focaliser notre recherche, nous avons éliminé les entreprises  
338 constructrices qui interrompaient la discussion avant de nous donner une réponse  
339 positive ou négative au sujet de notre demande d'échantillon gratuit (Filtre VI).  
340 Il existe 9 entreprises constructrices qui ont interrompu la discussion pour diverses  
341 raisons:

- 342 • Concept Laser: Plus de réponse de la personne de contact au cours de notre  
343 discussion, sans raison.
- 344 • Cubicon 3D Printer: Notre contact n'a jamais répondu à notre demande  
345 d'envoi d'échantillon gratuit.
- 346 • D3D Dynamo: Notre contact n'a jamais répondu à notre relance après la  
347 première partie de la discussion.
- 348 • Digital Wax Systems: Notre contact semble nous avoir bloqué. Nous  
349 n'arrivions plus à lui envoyer un e-mail, car notre e-mail était considéré  
350 comme SPAM.
- 351 • Formlabs: Notre contact n'a jamais répondu à notre relance après la  
352 première partie de la discussion.
- 353 • JGAurora: Notre contact n'a plus répondu après nous avoir demandé notre  
354 numéro de téléphone pour confirmer l'envoi.
- 355 • Robo 3D: Notre contact n'a jamais répondu à notre relance après la  
356 première partie de la discussion.
- 357 • SLM Solutions: Notre contact a interrompu la discussion car il voulait une  
358 discussion par téléphone.
- 359 • Wanhao: Notre contact n'a jamais répondu à notre relance post-première  
360 discussion.

361 Cette nouvelle exigence nous a laissé avec 59 imprimantes produites par 25  
362 entreprises.

363 Ensuite, nous avons éliminé les entreprises/revendeurs qui répondaient négativement  
364 à notre demande d'échantillon gratuit (Filtre VII).

365 Nous avons exclu cinq entreprises:

- 366 • 3D Facture: l'entreprise nous demandait de payer 15 dollars de frais de  
367 port.
- 368 • M3D: notre interlocuteur ne voulait pas nous envoyer un échantillon en  
369 expliquant qu'il était difficile pour eux d'en garder une trace.
- 370 • ORD Solutions: Notre interlocuteur nous a informé que l'entreprise était  
371 trop petite et qu'il ne peut pas envoyer des échantillons personnalisés aux  
372 personnes intéressées par leurs imprimantes 3D.
- 373 • Prodways: Notre interlocuteur voulait d'abord nous rencontrer avant de  
374 nous fournir un échantillon.
- 375 • Roboze: Notre interlocuteur voulait recevoir un code fiscal pour nous  
376 envoyer un échantillon.

377 Cette étape nous a laissé avec 46 imprimantes et 20 entreprises constructrices.

378 Une fois les échantillons réceptionnés, nous les avons répertoriés dans le tableau et  
379 numérotés. A partir de janvier 2018, nous avons exclu les entreprises dont nous  
380 n'avions pas reçu les colis. Nous ne saurons jamais s'ils se sont perdus ou s'ils n'ont  
381 jamais été envoyés (Filtre VIII).

382 Nous n'avons jamais reçu les colis que nous avaient promis six entreprises  
383 constructrices:

- 384 • Hyrel 3D,
- 385 • Moment,
- 386 • Nyomo,
- 387 • Raise 3D,
- 388 • Ultimaker,
- 389 • WASP.

390 Nous avons reçu des échantillons gratuits de 14 entreprises. Ce qui nous laisse 33  
391 imprimantes 3D, qui remplissaient pour le moment nos exigences.

392 Après avoir répertorié les échantillons, nous avons vérifié si les échantillons  
393 correspondaient à notre demande, à savoir un modèle imprimé en 3D issu du fichier  
394 que nous avons envoyé, avec une épaisseur de couche de maximum 25µm (Filtre  
395 IX).

396 Nous avons exclu cinq entreprises constructrices/revendeurs qui nous ont envoyé  
397 des échantillons pour différentes raisons:

- 399 • BQ: Nous avons bien reçu l'échantillon de notre fichier mais l'épaisseur de  
400 couche était non conforme à notre demande (100µm).

- 401 • Carima: Nous n'avons pas reçu l'échantillon issu de notre fichier mais un  
402 modèle 3D de segment d'arcade dentaire.
- 403 • Ilios: Nous n'avons pas reçu l'échantillon issu de notre fichier mais un  
404 modèle 3D d'une arcade dentaire et d'un bijou (bague).
- 405 • Photocentric 3D: Nous n'avons pas reçu l'échantillon issu de notre fichier  
406 mais trois modèles 3D d'arcades dentaires différentes.
- 407 • Volumic: Nous avons bien reçu l'échantillon issu de notre fichier mais  
408 l'épaisseur de couche était non conforme à notre demande, nous l'avons  
409 reçu en 100µm et en 50µm.

410 Ce qui nous a laissé avec 9 entreprises et 28 imprimantes.

411 Un dernier e-mail a été rédigé pour compléter une dernière fois notre tableau. Nous  
412 avons décidé de demander par e-mail les informations suivantes:

- 413
- 414 • Est-ce que l'imprimante 3D peut utiliser des matériaux bio-compatibles?
- 415 • Est-ce que l'entreprise est en possession d'une étude qui prouve  
416 scientifiquement la capacité de leur imprimante 3D à produire une  
417 épaisseur de couche de 25µm ou moins ?
- 418 • Est-il possible d'établir un contrat de maintenance?

419 En effet, la biocompatibilité est un critère important car les produits imprimés en 3D  
420 pourraient être utilisés dans la bouche du patient.

421 L'achat d'une imprimante 3D étant plus ou moins onéreux nous voulions savoir si,  
422 en plus de la garantie promise par le fabriquant, nous pouvions obtenir un contrat de  
423 maintenance supplémentaire, sur mesure.

424 Nous avons clôturé la réception de ce dernier e-mail et les discussions qui en  
425 découlent au 30/03/2018.

426 Sur les 9 entreprises constructrices ou revendeurs agréés, nous avons reçu 3  
427 réponses par rapport à la maintenance:

- 428 • Microlay: acceptation d'un contrat de maintenance,
- 429 • MassPortal: a accepté de discuter d'une prolongation d'un an de la garantie  
430 de base,
- 431 • Makex proposait une garantie basique.

432 Nous avons reçu 5 réponses de confirmation pour les matériaux biocompatibles  
433 utilisables pour les imprimantes 3D de chez Asiga, Kentstrapper, MassPortal,  
434 Microlay, Stratasys et une réponse négative de chez SolidScape, car ceux-ci utilisent  
435 de la cire qui doit être coulée dans un autre matériau pour obtenir la pièce finale  
436 utilisable.

437 Nous avons décidé d'exclure les imprimantes 3D de la firme SolidScape car celles-  
438 ci produisent des répliques en cire qui demandent beaucoup de matériel pour  
439 finalement être transformées en matériaux utilisables en bouche. Cette technologie  
440 est plus appropriée à un laboratoire dentaire (Filtre X).

441 Nous arrivions alors à un résultat de 27 imprimantes et 8 entreprises.

442 Nous avons demandé à nos interlocuteurs si les échantillons envoyés avaient subi un  
 443 post-traitement ou non à la sortie de leur imprimante 3D. Pour les imprimantes de  
 444 chez Dood, German RepRap, Makex, MassPortal, Microlay et Stratasys. Nos  
 445 interlocuteurs nous ont confirmés ne pas faire subir de post-traitement à la sortie de  
 446 la machine. L'échantillon de l'imprimante de la firme Kenstrapper a eu un post-  
 447 traitement au four à ultraviolet (UV). L'échantillon de l'imprimante de Asiga a eu  
 448 un post-traitement au flasheur UV. Ces post-traitements avaient pour but de stériliser  
 449 l'échantillon.

450 Nous avons demandé à nos contacts quelle(s) imprimante(s) 3D ils nous  
 451 conseillaient pour l'usage dentaire. Ceci nous a servi d'avant-dernier filtre (Filtre  
 452 XI).

453 Ce qui nous a laissé avec 13 imprimantes 3D pour 8 entreprises productrices.

454 La dentisterie étant une discipline médicale, qui exige pour ses procédés, ses  
 455 techniques, ses matériaux, ses appareils, une validation scientifique et ne peut pas se  
 456 contenter d'accepter sans vérification les données techniques des leurs entreprises  
 457 commerciales. C'est pour cette raison que nous avons décidé, en dernier lieu, de  
 458 considérer comme critère d'exclusion l'absence d'articles scientifiques validant la  
 459 précision de l'imprimante 3D au niveau de l'épaisseur de couche (25 $\mu$ m). Ce dernier  
 460 filtre nous a contraint à exclure toutes les imprimantes 3D restantes car aucun  
 461 interlocuteur ne nous a répondu de manière positive et certains n'ont pas répondu du  
 462 tout à cette question (Filtre XII). Le Tableau 1 résume l'ensemble de processus de  
 463 sélection d'imprimantes 3D de notre étude.

464  
 465

**Tableau 1.** Processus de sélection d'imprimantes 3D de notre étude.

| Filtres  | Entreprises constructrices | Imprimantes 3D | Pourcentage (%) d'imprimantes 3D validant les filtres |
|--|----------------------------|----------------|---|
| Aucun  | 342                        | 1037           | 100   |
| 1. Imprimantes précises à 25 microns             | 87                         | 211            | 20  |
| 2. Réponse reçue par e-mail en moins de 30 jours | 53                         | 154            | 15  |
| 3. Imprimantes vendues assemblées                | 50                         | 147            | 14  |
| 4. Imprimantes adaptées en                       | 43                         | 115            | 11  |

|   |    |    |   |
|---|----|----|---|
| dentisterie, capables d'imprimer à 25 microns sans artéfact, réponses sérieuses des entreprises |    |    |   |
| 5. Réponse à la demande de l'échantillon  | 34 | 82 | 8 |
| 6. Maintien de la discussion  | 25 | 59 | 6 |
| 7. Réponse positive à la demande de l'échantillon   | 20 | 46 | 4 |
| 8. Colis reçu avant Janvier 2018  | 14 | 33 | 3 |
| 9. Echantillon correspondant à notre demande  | 9  | 28 | 3 |
| 10. Exclusion de l'entreprise constructrice Solidscape  | 8  | 25 | 2 |
| 11. Imprimante(s) recommandée(s) par notre interlocuteur  | 8  | 13 | 1 |
| 12. Validation scientifique pour l'utilisation dentaire   | 0  | 0  | 0 |

466

## Résultats

467

468

469

470

471

472

Les trois principales zones économiques hébergeant l'industrie des imprimantes 3D (25µm), c'est à dire précises à 25 microns, sont l'Union européenne (43 entreprises, dont 11 en Allemagne), les Etats-Unis (23 entreprises), et la Chine (10 entreprises). Les deux principaux procédés d'impression utilisés dans les imprimantes 3D (25µm) sont les procédés FFF/FDM (43%) et DLP/SLA (38%). Plus de la moitié des imprimantes 3D pourraient imprimer, d'après leur fiche



473 technique, avec une épaisseur de couche minimale comprise entre 25 et 100 $\mu$ m  
 474 (Tableau 2).  
 475  
 476

**Tableau 2.** Nombre d'imprimante(s) 3D par épaisseur de couche minimale.

| Épaisseur de couche minimale (microns) | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|--|------------------------|-----------------|
| $\leq 1$                               | 8                      | 1               |
| $1 < x \leq 10$                        | 44                     | 4               |
| $10 < x \leq 20$                       | 88                     | 8               |
| $20 < x \leq 25$                       | 74                     | 7               |
| $25 < x \leq 50$                       | 247                    | 24              |
| $50 < x \leq 100$                      | 312                    | 30              |
| $100 < x \leq 1000$                    | 79                     | 8               |
| Non communiqué                         | 185                    | 18              |
| Total                                  | 1037                   | 100             |

477  
 478 Pour près de la moitié des imprimantes 3D (25 $\mu$ m), l'unité de mesure de la  
 479 résolution selon les axes XY n'est pas communiquée (Tableau 3). Par ailleurs, il  
 480 existe au moins 4 unités de mesures différentes de résolution proposées sur les sites  
 481 d'imprimantes 3D.  
 482

**Tableau 3.** Entreprise(s) constructrice(s) et imprimante(s) 3D par unité de mesure utilisée pour caractériser la résolution XY minimale.

| Unité de mesure  | Nombre d'imprimantes 3D | %   | Nombre d'entreprises | %   |
|------------------|-------------------------|-----|----------------------|-----|
| Micron           | 102                     | 48  | 46                   | 52  |
| DPI*             | 4                       | 2   | 2                    | 2   |
| DPI <sup>2</sup> | 4                       | 2   | 2                    | 2   |
| Pixel            | 2                       | 1   | 1                    | 1   |
| Non communiqué   | 99                      | 47  | 37                   | 43  |
| Total            | 211                     | 100 | 87                   | 100 |

485 \*DPI : « dots per inch » (« point par pouce ») : est une unité de mesure de la résolu-  
 486 tion qui est principalement utilisée pour les écrans, les imprimantes et les scanners.  
 487 Plus il existe de points par pouce, meilleure est la résolution.  
 488

489 Les données du Tableau 3 montrent que près de la moitié des imprimantes 3D  
 490 (25 $\mu$ m) ne communiquent pas d'information sur la résolution selon les axes XY.  
 491 L'unité de mesure la plus commune pour caractériser la résolution XY est le micron.  
 492 Elle est utilisée par plus de la moitié des entreprises constructrices.  
 493  
 494  
 495  
 496  
 497  
 498

499 **Tableau 4.** Résolution XY minimale (en micron).

| Résolution XY (microns) | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|-------------------------|------------------------|-----------------|
| 1 à 9                   | 16                     | 16              |
| 10 à 25                 | 38                     | 37              |
| 26 à 49                 | 21                     | 21              |
| 50 à 99                 | 20                     | 20              |
| ≥ 100                   | 7                      | 6               |
| Total                   | 102                    | 100             |

500 Près de la moitié des imprimantes 3D (25µm) ont une résolution XY supérieure à  
501 25µm (Tableau 4).  
502  
503

504 **Tableau 5.** Imprimante(s) 3D vendue(s) assemblée(s) ou en kit.

| Imprimante vendue | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|-------------------|------------------------|-----------------|
| En Kit            | 7                      | 3               |
| Assemblée         | 204                    | 97              |
|                   | 211                    | 100             |

505 **Tableau 6.** Types de calibrage rencontrés.  
506

| Type de calibrage | Nombre d'imprimantes 3D |
|-------------------|-------------------------|
| Manuel            | 15                      |
| Semi-automatique  | 10                      |
| Automatique       | 58                      |
| Non communiqué    | 128                     |
|                   | 211                     |

507 La quasi-totalité des imprimantes 3D (25µm) sont vendues assemblées (Tableau 5).  
508 Plus de la moitié des fiches techniques des imprimantes 3D ne mentionnait pas  
509 explicitement le type de calibrage utilisé (Tableau 6).  
510 74% d'imprimantes 3D (25µm) évoluent dans un environnement d'impression fermé  
511 (de type propriétaire). En ce qui concerne la technologie FFF/FDM, 68% des  
512 imprimantes 3D possèdent un plateau chauffant mais dans 29% des cas cette infor-  
513 mation n'est pas communiquée dans la fiche technique. Il existe une grande diversité  
514 des unités de mesure utilisées pour caractériser la vitesse d'impression des  
515 imprimantes 3D (25µm). En effet, le Tableau 7 comporte 10 unités de mesures  
516 différentes. Par contre le manque d'information lié à la vitesse d'impression est  
517 présent pour plus de la moitié des marques d'imprimantes 3D étudiées.  
518  
519  
520

**Tableau 7.** Unités de mesure de la vitesse d'impression 3D.

| Unité de mesure de la vitesse d'impression | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|--|------------------------|-----------------|
| mm/s                                       | 61                     | 29              |
| mm/h                                       | 13                     | 6               |
| cm/h                                       | 6                      | 3               |
| s/couche                                   | 5                      | 2               |

|                |     |    |
|----------------|-----|----|
| cm3/h          | 5   | 2  |
| mm3/s          | 4   | 2  |
| m/s            | 1   | <1 |
| cm2/h          | 1   | <1 |
| cc/h           | 1   | <1 |
| ml/h           | 1   | <1 |
| Non communiqué | 113 | 53 |

521

522

**Tableau 8.** Capacité d'impression des arcades dentaires.

| Nombre d'arcade(s) dentaire(s) imprimable(s) par plateau | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage |
|--|------------------------|-------------|
| 0  | 15                     | 7           |
| 1 à 9  | 63                     | 29          |
| 10 à 49  | 89                     | 42          |
| 50 à 99  | 14                     | 6           |
| > 100  | 13                     | 6           |
| Non calculable par un dentiste                           | 7                      | 3           |
| Non communiqué   | 10                     | 5           |
| Total  | 211                    | 100         |

523

524

525

526

527

528

529

530

531

532

533

534

535

536

537

538

En ce qui concerne la capacité d'impression 3D des modèles des arcades dentaires en même temps (Tableau 8), nous avons pris comme référence la taille moyenne d'une arcade dentaire normale [11] et nous avons calculé le nombre d'arcades que nous pourrions imprimer simultanément. Cette valeur est issue d'un calcul théorique ne prenant pas en compte la capacité du logiciel utilisé par l'imprimante 3D à pouvoir lancer et gérer simultanément des impressions 3D différentes sur un même plateau d'impression. Pour diminuer le risque de gauchissement de l'impression 3D (par effet de refroidissement non homogène de la pièce imprimée), nous avons aussi décidé de simuler l'impression 3D des modèles des arcades dentaires parallèlement au plateau d'impression et non perpendiculairement à celui-ci. 40% des imprimantes 3D sont capables d'imprimer simultanément entre 10 et 49 modèles 3D d'arcade dentaire.

**Tableau 9.** Imprimante(s) pouvant ou non utiliser des matériaux différents de ceux de l'entreprise constructrice.

| Restrictions au niveau des matériaux utilisables                                      | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|---|------------------------|-----------------|
| Uniquement matériaux propres à l'entreprise constructrice                             | 49                     | 23              |
| Possibilité d'utiliser des matériaux différents de ceux de l'entreprise constructrice | 46                     | 22              |

|                |     |     |
|----------------|-----|-----|
| Non communiqué | 116 | 55  |
|                | 211 | 100 |

539

540

541

542

543

544

545

Le Tableau 9 met en évidence le manque d'information disponible au sujet de la capacité des imprimantes 3D (25 $\mu$ m) à utiliser des matériaux ne venant pas directement de la firme productrice des imprimantes.

**Tableau 10.** Imprimante(s) 3D pouvant utiliser ou non des matériaux biocompatibles.

| Utilisation de matériaux biocompatibles | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|---|------------------------|-----------------|
| NON                                     | 1                      | 1               |
| OUI                                     | 47                     | 22              |
| Non communiqué                          | 163                    | 77              |
|   | 211                    | 100             |

546

547

548

549

550

551

Les données du Tableau 10 montrent le manque d'information disponible au sujet de la capacité des imprimantes 3D (25 $\mu$ m) à utiliser des matériaux biocompatibles.

**Tableau 11.** Possibilité de faire passer une imprimante 3D à travers une porte de dimensions spécifiques.

| Dimensions de porte   | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|---|------------------------|-----------------|
| Standard (largeur: <à 63 cm/hauteur: $\leq$ 200 cm)   | 121                    | 57              |
| répondant aux standards minimum permettant le passage d'une personne handicapée (largeur: >63 et $\leq$ 85 cm/hauteur: $\leq$ à 200 cm) | 25                     | 12              |
| > à 85 cm de largeur  | 37                     | 18              |
| Non communiqué  | 28                     | 13              |
| Total   | 211                    | 100             |

552

553

554

555

556

Une majorité d'imprimantes 3D (25 $\mu$ m) peuvent être déplacées facilement à travers une porte aux dimensions standard minimales [12] (Tableau 11).

**Tableau 12.** Imprimante(s) 3D par tranche de poids.

| Poids de l'imprimante (Kg) | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|----------------------------|------------------------|-----------------|
| $\leq$ 25                  | 68                     | 32              |
| 25<x $\leq$ 50             | 31                     | 15              |
| 50<x $\leq$ 100            | 17                     | 8               |
| 100<x $\leq$ 1000          | 32                     | 15              |
| > 1000                     | 22                     | 10              |
| Non communiqué             | 41                     | 20              |
| Total                      | 211                    | 100             |

557  
558  
559  
560  
561  
562  
563

Il existe une grande variabilité dans le poids d'une imprimante 3D (25 $\mu$ m) (Tableau 12). Le poids peut varier de moins de 25 Kg à plus d'une tonne. Le poids maximum d'une imprimante 3D (25 $\mu$ m) est de 5700 Kg: M Line Factory (Concept Laser). Le poids minimum d'une imprimante 3D (25 $\mu$ m) est de 1 Kg: M3D Pro (M3D).

**Tableau 13.** Imprimante(s) compatible(s) selon système(s) d'exploitation.

| Système(s) d'exploitation compatibles(s) | Nombres d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|--|-------------------------|-----------------|
| Uniquement Windows (Microsoft)           | 86                      | 41              |
| Uniquement Mac OS (Apple)                | 0                       | 0               |
| Uniquement Linux (Logiciel libre)        | 0                       | 0               |
| Mac OS et Windows                        | 22                      | 10              |
| Linux et Windows                         | 1                       | 0               |
| Mac OS et Linux                          | 0                       | 0               |
| Mac OS - Linux - Windows                 | 46                      | 22              |
| Non communiqué                           | 56                      | 27              |
| Total                                    | 211                     | 100             |

564  
565  
566  
567  
568

Les données du Tableau 13 montrent que toutes les imprimantes 3D sont compatibles avec le système d'exploitation Windows.

**Tableau 14.** Imprimantes compatibles par format de fichier d'impression 3D.

| Format de fichier d'impression 3D | Nombre d'imprimante(s)/211 | Pourcentage (%) |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------------|
| .stl                              | 115                        | 55              |
| .obj                              | 63                         | 30              |
| .slc                              | 38                         | 18              |
| .3ds                              | 21                         | 10              |
| .ply                              | 20                         | 9               |
| .amf                              | 20                         | 9               |
| .mkr                              | 11                         | 5               |
| .3dm                              | 11                         | 5               |
| .lwo                              | 11                         | 5               |
| .x                                | 11                         | 5               |
| .nauta                            | 8                          | 4               |
| .fictor                           | 8                          | 4               |
| .bmp                              | 6                          | 3               |
| .bj                               | 5                          | 2               |
| .png                              | 5                          | 2               |
| .stm                              | 4                          | 2               |
| .ctl                              | 3                          | 1               |

|                |    |    |
|----------------|----|----|
| .dws3          | 3  | 1  |
| .dws2          | 3  | 1  |
| .form          | 2  | <1 |
| .zpr           | 2  | <1 |
| .zbd           | 2  | <1 |
| .wrl           | 2  | <1 |
| .fbx           | 2  | <1 |
| .iges          | 2  | <1 |
| .igs           | 2  | <1 |
| .step          | 2  | <1 |
| .stp           | 2  | <1 |
| .mjpdtd        | 2  | <1 |
| .i             | 2  | <1 |
| .objdf         | 2  | <1 |
| .gco           | 1  | <1 |
| .vrml          | 1  | <1 |
| .plt           | 1  | <1 |
| .dxl           | 1  | <1 |
| .dae           | 1  | <1 |
| Non communiqué | 89 | 42 |

569  
570  
571  
572  
573  
574

Il existe une très grande disparité et diversité des formats utilisés par les imprimantes 3D (25µm) avec 36 formats de fichier différents (Tableau 14).

**Tableau 15.** Notification du prix des imprimantes 3D sur le site internet du constructeur.

| Notification du prix des imprimantes sur le site internet constructeur | Nombre d'entreprise(s) constructrice(s) | Pourcentage (%) | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|--|---|-----------------|------------------------|-----------------|
| OUI  | 35                                      | 40              | 68                     | 32              |
| NON  | 52                                      | 60              | 143                    | 68              |

575  
576  
577  
578  
579

Dans 2/3 des cas la notion de prix des imprimantes 3D est manquante sur le site web du constructeur (Tableau 15).

**Tableau 16.** Prix des imprimantes 3D.

| Prix (en €)        | Nombre d'imprimante(s) 3D | Pourcentage (%) |
|--------------------|---------------------------|-----------------|
| < à 500            | 0                         | 0               |
| entre 500 et 1000  | 6                         | 3               |
| entre 1000 et 2000 | 17                        | 8               |
| entre 2000 et 3000 | 13                        | 6               |
| entre 3000 et 4000 | 11                        | 5               |
| entre 4000 et 5000 | 5                         | 2               |

|                      |     |     |
|----------------------|-----|-----|
| entre 5000 et 7500   | 11  | 5   |
| entre 7500 et 10 000 | 3   | 2   |
| > à 10 000           | 2   | 1   |
| Non communiqué       | 143 | 68  |
|                      | 211 | 100 |

580  
581  
582  
583  
584

Les prix ne sont pas inférieurs à 500€ pour les imprimantes 3D avec un prix connu (Tableau 16).

**Tableau 17.** Prix des imprimantes 3D en fonction du procédé d'impression.

| Procédé d'impression 3D | Imprimante 3D avec le plus petit coût (entreprise constructrice) (en euro) | Imprimante 3D avec le plus grand coût (entreprise constructrice) (en euro) | Prix moyen d'une imprimante 3D (en euro) |
|-------------------------|--|--|--|
| FDM/FFF*                | Beeprusa<br>(Beeverycreative)<br>529                                       | Xcel (Leapfrog)<br>27.224  | 3.661                                    |
| DLP/SLA**               | Liquid Crystal Precision<br>(Photocentric3D)<br>1.421                      | Freeform Pico Plus 27/33/33<br>(Asiga)<br>7.301                            | 4.292                                    |

585  
586  
587  
588  
589  
590  
591  
592

\*FDM/FFF : fused deposition modelling/fused; fused filament fabrication

\*\*DLP/SLA: digital light processing/stéréolithographie

Le prix moyen d'une imprimante 3D (25µm) à procédé d'impression FDM/FFF est moins élevé que le prix moyen d'une imprimante 3D utilisant la technologie plus sophistiquée et onéreuse DLP/SLA (Tableau 17).

**Tableau 18.** Devises des prix renseignés sur le site internet du constructeur.

| Prix donné en          | Nombre d'imprimante(s) avec prix accessible sur le site web du constructeur | Pourcentage (%) |
|------------------------|---|-----------------|
| Euro (€)               | 31  | 46              |
| Dollar (\$)            | 30  | 44              |
| Livre Sterling (£)     | 6   | 9               |
| Zloty (PLN) (Pologne)  | 1   | 1               |
| 4 monnaies différentes | 68  | 100             |

593  
594  
595  
596  
597

90 % des prix des imprimantes 3D (25µm) sont exprimés en Dollar ou en Euro sur les sites Internet des entreprises constructrices (Tableau 18).

598 **Tableau 19.** Prix de l'imprimante 3D indiqué avec ou sans taxes.

| Prix de l'imprimante indiqué avec : | Nombre d'imprimante(s) dont le prix est indiqué sur le site internet constructeur | Pourcentage (%) |
|-------------------------------------|---|-----------------|
| Taxes comprises                     | 9   | 13              |
| Taxes non comprises                 | 19  | 28              |
| Non communiqué                      | 40  | 59              |
|                                     | 68  | 100             |

599 On notera un manque d'information important (59%) lié à l'inclusion ou non des  
600 taxes dans le prix indiqué des imprimantes 3D (25µm) sur le site Internet des  
601 entreprises constructrices (Tableau 19).  
602  
603

604 **Tableau 20.** Le service après-vente.

| Le service après-vente est assuré par | Nombre d'entreprise(s) constructrice(s) | Pourcentage (%) |
|---------------------------------------|---|-----------------|
| Entreprise constructrice              | 40                                      | 46              |
| Tiers                                 | 2                                       | 2               |
| Non communiqué                        | 45                                      | 52              |
|                                       | 87                                      | 100             |

605 Plus de la moitié des entreprises constructrices n'inscrit pas clairement sur leur site  
606 Internet à qui incombe la responsabilité du service après-vente (Tableau 20).  
607  
608

609 **Tableau 21.** Durée de garantie pour les imprimante(s) 3D.

| Durée de garantie | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|-------------------|------------------------|-----------------|
| 6 mois            | 12                     | 6               |
| 1 an              | 52                     | 24              |
| 2 ans             | 8                      | 4               |
| Non communiqué    | 139                    | 66              |
|                   | 211                    | 100             |

610 Dans plus de 2/3 des cas l'information liée à la durée de la garantie des imprimantes  
611 3D (25µm) n'est pas indiquée sur le site Internet des entreprises constructrices.  
612  
613

614 **Tableau 22.** Le financement participatif dans le monde de l'impression  
615 dentaire 3D.

| Imprimante (entreprise constructrice) | Site de financement participatif | Financement participatif réussi | Argent récolté /argent demandé | Imprimante commercialisée  | Site internet de l'entreprise constructrice |
|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---|
| Draken (3D Facture)                   | Kickstarter                      | Oui                             | 171.664US\$/pas de plafond     | Oui, toujours actuellement | En ligne                                    |
| Doom Pro (Dood)                       | Kisskissbankbank                 | Oui                             | 7.837 €/5.000 €                | Oui, toujours actuellement | En ligne                                    |
| Elemental (Hardcotton)                | Kickstarter                      | Non                             | 67.986AU\$/250.000A US\$       | Non                        | Inexistant                                  |



|  |             |     |                           |                             |            |
|--|-------------|-----|---------------------------|-----------------------------|------------|
| M3D Pro (M3D)  | Indiegogo   | Oui | 953.215US\$/195.732US\$   | Oui, toujours actuellement  | En ligne   |
| Portobello (Orchis Print Solution)                   | Kickstarter | Non | 3.390€/35.000 €           | Non                         | Inexistant |
| RoVa4D Full Color Blender 3D Printer (ORD Solutions) | Kickstarter | Oui | 216.288CAD\$/25.000CAD\$  | Oui toujours actuellement   | En ligne   |
| 3Fextrud 25 duo (ShapingBits)                        | Kickstarter | Oui | 62.453US\$/pas de plafond | Oui, mais plus actuellement | Inexistant |
| 3Fextrud 30 duo extmat (ShapingBits)                 | Kickstarter | Oui | 62 453US\$/pas de plafond | Oui, mais plus actuellement | Inexistant |
| Stalactite 102 (Stalactite)                          | Indiegogo   | Oui | 52.569 €/50.000 €         | Oui, mais plus actuellement | Inexistant |
| Cyrus 3D Printer (Cyrus)                             | Kickstarter | Non | 19.685 £/30.000£          | Non                         | Inexistant |

616  
617  
618  
619  
620  
621  
622  
623  
624  
625  
626  
627  
628

Les données du Tableau 22 montrent que 70% des campagnes de financement participatif d'une imprimante 3D (25µm) ont été couronnées de succès. Cependant 60% d'imprimantes 3D ne sont plus commercialisées et le site web n'existe plus dans 60% des cas. ShapingBits (2 types d'imprimantes 3D) n'a jamais livré toutes les imprimantes 3D promises et l'entrepreneur n'a jamais remboursé les clients qui n'ont pas reçu leur imprimante 3D.

En ce qui concerne le contact par email avec les entreprises constructrices, nous avons reçu 235 e-mails publicitaires dans notre boîte e-mail de réception du 21/03/17 (début d'expérience) jusqu'au 12/04/18 (fin d'expérience) inclus. Huit entreprises constructrices nous ont répondu sur Facebook ou via Twitter.

**Tableau 23.** Origine du premier e-mail reçu.

| Origine du 1er mail reçu | Nombre de réponse(s) reçue(s) | Pourcentage (%) |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|
| Entreprise productrice   | 46                            | 87              |
| Revendeur                | 7                             | 13              |
|                          | 53                            | 100             |

629  
630  
631  
632  
633  
634  
635  
636  
637

Une entreprise constructrice, Nyomo, nous a contacté alors que nous ne leurs avons pas envoyé d'e-mail de contact. Un de leurs revendeurs leur a indiqué que nous cherchions une imprimante 3D (25µm). Cela explique que le total des e-mails reçus soit de 53 réponses dans le Tableau 23. Lorsqu'une entreprise constructrice est contactée par e-mail, celle-ci répond par l'intermédiaire d'un de ses salariés dans 87% des cas. Sur 46 entreprises à nous avoir répondu directement, 6 nous ont ensuite redirigés vers un revendeur.

638 **Tableau 24.** Délais de réponses des entreprises constructrices au 1er e-mail  
639 de contact.

| Délais de réponse  | Nombre de réponse(s) reçue(s) | Pourcentage (%) |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| ≤ 3 jours          | 43                            | 83              |
| Entre 4 à 7 jours  | 3                             | 5               |
| Entre 8 à 30 jours | 6                             | 12              |
|                    | 52                            | 100             |

640  
641 Quand entreprise constructrice était contactée par e-mail, une réponse nous est par-  
642 venue en 3 jours ou moins dans une grande majorité des cas (Tableau 24).

643 **Tableau 25.** Langue utilisée pour répondre à notre email de contact bilingue  
644 (anglais-français).  
645

| Langue   | Nombre de réponse(s) reçue(s) | Pourcentage (%) |
|----------|-------------------------------|-----------------|
| Anglais  | 43                            | 83              |
| Français | 8                             | 15              |
| Chinois  | 1                             | 2               |
|          | 52                            | 100             |

646  
647 Quand une entreprise constructrice a été contactée avec un e-mail bilingue anglais-  
648 français, la réponse que nous avons reçu était rédigée en anglais dans une grande  
649 majorité des cas (Tableau 25).

650 **Tableau 26.** Nombre de contacts différents lors de la discussion par e-mail.  
651

| Nombre de contacts différents lors de la discussion par e-mail | Nombre d'entreprise(s) constructrice(s) et revendeur(s) | Pourcentage (%) |
|--|---|-----------------|
| 1  | 37  | 70              |
| 2  | 8   | 15              |
| 3  | 6   | 11              |
| 4  | 2   | 4               |
|  | 53  | 100             |

652  
653 Dans 70% des cas la discussion se déroulait toujours avec la même personne  
654 (Tableau 26).

655 **Tableau 27.** Réponses des contacts à notre demande d'envoi d'un  
656 échantillon personnalisé gratuit.  
657

| Entreprise constructrice | Accepte l'envoi d'un échantillon personnalisé gratuit | Raison du non-envoi d'un échantillon     | Entreprise constructrice ou revendeur |
|--------------------------|---|--|---------------------------------------|
| 3DFacture                | Non   | Il faut payer les frais de port (15US\$) | Entreprise constructrice              |

|                    |     |  |                          |
|--------------------|-----|--|--------------------------|
| Asiga              | Oui | -  | Revendeur                |
| Bq                 | Oui | -  | Revendeur                |
| Carima             | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| Concept Laser      | Non | Pas de réponse à notre demande d'échantillon                   | Entreprise constructrice |
| Cubicon 3D Printer | Non | Pas de réponse à notre demande d'échantillon                   | Entreprise constructrice |
| D3D Dynamo         | Non | Pas de réponse à notre demande d'échantillon                   | Revendeur                |
| Digital Wax System | Non | Pas de réponse à notre demande d'échantillon                   | Revendeur                |
| Dood               | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| Formlabs           | Non | Pas de réponse à notre demande d'échantillon                   | Entreprise constructrice |
| German RepRap      | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| Hyrel 3D           | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| Ilios              | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| JG Aurora          | Non | Pas de réponse de confirmation d'envoi                         | Entreprise constructrice |
| Kentstrapper       | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| M3D                | Non | N'envoie pas d'échantillon car difficile d'en garder une trace | Entreprise constructrice |
| Makex              | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| MassPortal         | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| Microlay           | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| Moment             | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| Nyomo              | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| ORD Solutions      | Non | Il faut payer l'échantillon (200US\$)                          | Entreprise constructrice |

|                |     |  |                          |
|----------------|-----|--|--------------------------|
| PhotoCentric3D | Oui | -  | Revendeur                |
| Prodways       | Non | Demande un contact téléphonique              | Entreprise constructrice |
| Raise3D        | Oui | -  | Revendeur                |
| Robo 3D        | Non | Pas de réponse à notre demande d'échantillon | Entreprise constructrice |
| Roboze         | Non | Demande un code fiscal pour envoyer          | Entreprise constructrice |
| SLM Solution   | Non | Pas de réponse à notre demande d'échantillon | Entreprise constructrice |
| Solidscape     | Oui | -  | Revendeur                |
| Stratasys      | Oui | -  | Revendeur                |
| Ultimaker      | Oui | -  | Revendeur                |
| Volumic        | Oui | -  | Entreprise constructrice |
| Wanhao         | Non | Pas de réponse à notre demande d'échantillon | Entreprise constructrice |
| WASP           | Oui | -  | Entreprise constructrice |

658  
659  
660  
661  
662  
663  
664  
665  
666

L'interlocuteur de notre discussion par e-mail a accepté, dans 59% des cas, d'envoyer gratuitement un échantillon personnalisé, imprimé avec épaisseur de couche définie. La majorité des revendeurs ont accepté de nous envoyer cet échantillon (78%) mais les entreprises constructrices n'ont accepté d'envoyer cet échantillon que dans 52% des cas (Tableau 27).

**Tableau 28.** Synthèse de contacts avec les entreprises constructrices ayant répondu positivement à notre demande d'échantillon.

| Entreprise Constructrice | Date d'envoi du 1er e-mail | Date de l'e-mail validant l'envoi | Nombre de messages | Durée (jour) | Relance effectuée |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------|-------------------|
| Asiga                    | 15.09.17                   | 27.09.17                          | 4                  | 12           | Non               |
| Bq                       | 15.09.17                   | 30.10.17                          | 3                  | 45           | Oui               |
| Carima                   | 15.09.17                   | 31.10.17                          | 8                  | 46           | Oui               |
| Dood                     | 16.09.17                   | 03.10.17                          | 9                  | 17           | Non               |
| German RepRap            | 16.09.17                   | 03.11.17                          | 3                  | 48           | Oui               |
| Hyrel 3D                 | 16.09.17                   | 02.11.17                          | 5                  | 47           | Oui               |
| Ilios                    | 16.09.17                   | 16.09.17                          | 4                  | 0            | Non               |
| Kentstrapper             | 16.09.17                   | 12.12.17                          | 14                 | 87           | Oui               |
| Makex                    | 16.09.17                   | 09.11.17                          | 15                 | 54           | Oui               |
| Massportal               | 16.09.17                   | 11.10.17                          | 11                 | 25           | Non               |
| Microlay                 | 15.11.17                   | 05.12.17                          | 9                  | 20           | Non               |
| Moment                   | 16.09.17                   | 30.10.17                          | 5                  | 44           | Oui               |
| Nyomo                    | 16.09.17                   | 31.10.17                          | 6                  | 45           | Oui               |

|                |          |          |    |    |     |
|----------------|----------|----------|----|----|-----|
| Photocentric3D | 16.09.17 | 02.11.17 | 7  | 47 | Oui |
| Raise3D        | 16.09.17 | 13.11.17 | 10 | 58 | Oui |
| Solidscape     | 16.09.17 | 24.09.17 | 3  | 8  | Non |
| Stratasys      | 16.09.17 | 25.09.17 | 4  | 9  | Non |
| Ultimaker      | 16.09.17 | 20.09.17 | 2  | 4  | Non |
| Volumic        | 16.09.17 | 18.09.17 | 2  | 2  | Oui |
| WASP           | 16.09.17 | 30.10.17 | 5  | 44 | Oui |

667  
668  
669  
670  
671  
672  
673  
674  
675  
676  
677

Il fallait, en moyenne, 6 messages et 33 jours pour recevoir une réponse positive à une demande d'échantillon personnalisé, imprimé avec une épaisseur de couche définie et gratuit (Tableau 28). Nous avons dû insister auprès de 60% des entreprises pour maintenir la conversation. Deux entreprises productrices ou revendeurs sur les 20 ont d'abord refusé de nous envoyer un échantillon gratuit puis ont accepté: Kentstrapper demandait d'envoyer un colis déjà affranchi et Makex demandait 14US\$ pour envoyer un échantillon gratuit.

**Tableau 29.** Synthèse de la discussion avec les entreprises constructrices nous ayant répondu positivement à notre demande.

| Entreprise constructrice | Colis reçu | 1er échantillon reçu et conforme | Echantillon conforme reçu dans le 2ème envoi | Reçu au moins un échantillon conforme |
|--------------------------|------------|----------------------------------|--|---------------------------------------|
| Asiga                    | Oui        | Oui                              | -  | Oui                                   |
| Bq                       | Oui        | Non                              | Non  | Non                                   |
| Carima                   | Oui        | Non                              | Non  | Non                                   |
| Dood                     | Oui        | Oui                              | -  | Oui                                   |
| German RepRap            | Oui        | Oui                              | -  | Oui                                   |
| Hyrel 3D                 | Non        | -                                | -  | Non                                   |
| Ilios                    | Oui        | Non                              | Non  | Non                                   |
| Kentstrapper             | Oui        | Oui                              | -  | Oui                                   |
| Makex                    | Oui        | Oui                              | -  | Oui                                   |
| Massportal               | Oui        | Non                              | Oui  | Oui                                   |
| Microlay                 | Oui        | Oui                              | -  | Oui                                   |
| Moment                   | Non        | -                                | -  | Non                                   |
| Nyomo                    | Non        | -                                | -  | Non                                   |
| Photocentric3D           | Oui        | Non                              | Non  | Non                                   |
| Raise3D                  | Non        | -                                | -  | Non                                   |
| Solidscape               | Oui        | Oui                              | -  | Oui                                   |
| Stratasys                | Oui        | Non                              | Oui  | Oui                                   |
| Ultimaker                | Non        | -                                | -  | Non                                   |
| Volumic                  | Oui        | Non                              | Non  | Non                                   |
| WASP                     | Non        | -                                | -  | Non                                   |

678  
679  
680  
681

Les colis ont été reçus dans 70% des cas. Dans 65% des cas, le 1<sup>er</sup> échantillon n'était pas conforme à notre demande. Dans 71% des cas, le 2<sup>ème</sup> échantillon n'était toujours pas conforme à notre demande. Dans 45% des cas, l'échantillon était

682 finalement conforme à notre demande (Tableau 29).

683

684

685

**Tableau 30.** Evolution des imprimantes sur le marché de l'impression 3D depuis le 28.02.2017.

|  | Nombre d'imprimante(s) | Pourcentage (%) |
|--|------------------------|-----------------|
| Imprimantes toujours commercialisées au 01.03.18           | 145                    | 69              |
| Imprimantes qui n'étaient plus commercialisées au 01.03.18 | 66                     | 31              |
|  | 211                    | 100             |

686

687

688

689

690

691

Plus d'un tiers d'imprimantes 3D (25µm) qui étaient présentes sur le marché le 28 février 2017 n'étaient plus commercialisées au mois d'avril 2018 (Tableau 30).

**Tableau 31.** Evolution des entreprises sur le marché de l'impression 3D depuis le 28.02.2017.

|  | Nombre d'entreprise(s) | Pourcentage (%) |
|--|------------------------|-----------------|
| Entreprises constructrices possédant toujours un site internet au 01.03.18 | 76                     | 87              |
| Entreprises constructrices ne possédant plus de site internet au 01.03.18  | 11                     | 13              |
|  | 87                     | 100             |

692

693

694

695

696

13% des entreprises productrices ont disparu du marché durant la durée de notre travail. Les 11 entreprises constructrices, qui ne possèdent plus de site Internet constructeur, produisaient 20 imprimantes, ce qui représente 9% des imprimantes 3D (25µm) (Tableau 31).

697

## Discussion

### Manque d'uniformisation au niveau des imprimantes 3D

698

699

700

701

702

703

704

705

Nous avons constaté un manque d'uniformisation au niveau des imprimantes 3D pour l'usage dentaire. Nous allons l'illustrer à travers quatre exemples: les procédés d'impression 3D, les unités caractérisant la vitesse d'impression 3D, les formats de fichiers utilisés pour l'impression 3D et la résolution d'impression 3D selon les axes XY. De nombreuses entreprises constructrices possèdent leur propre procédé d'impression 3D. Souvent, ceux-ci ne diffèrent que légèrement les uns des autres. Nous avons recensé, au total 14 technologies différentes pour les imprimantes 3D (25µm) [13]. La vitesse d'impression est actuellement une des faiblesses de la

706 fabrication additive. En effet, la vitesse d'impression 3D reste lente par rapport à la  
707 fabrication soustractive, ce qui limite actuellement la technologie additive au  
708 domaine du prototypage. Ce problème est accentué par un manque d'uniformisation  
709 au niveau des unités de mesure utilisées pour caractériser la vitesse d'impression  
710 3D. Nous avons recensé 10 unités de mesure différentes: 4 unités de vitesse (mm/s,  
711 mm/h, cm/h et m/s), 4 unités de débit (cm<sup>3</sup>/h, mm<sup>3</sup>/s, cc/h, ml/h) et deux unités  
712 inclassables à savoir le « s/couche » et le « cm<sup>2</sup>/h » (Tableau 7). S'il est possible de  
713 comparer, en les convertissant, des vitesses entre elles ou des débits entre eux,  
714 certaines unités de mesure restent toujours non comparables. Il est difficile, par  
715 exemple, de comparer un débit à une vitesse ou un nombre en « s/couche » à un  
716 nombre en « cm<sup>2</sup>/h ». Pourtant cette caractéristique technique est déterminante dans le  
717 choix d'une imprimante 3D. Le nombre de formats de fichiers de modélisation 3D  
718 utilisés par les imprimantes 3D est très important (Tableau 14). Les imprimantes 3D  
719 (25µm) que nous avons recensées utilisent à elles seules 36 formats de fichiers  
720 différents (Tableau 14). Parmi ceux-ci, il en existe 23 qui ne sont compatibles  
721 qu'avec 1 à 5 imprimantes différentes. Les deux formats les plus fréquemment  
722 utilisés sont « .stl » (55% des imprimantes) et « .obj » (30%). Il faut noter que ce  
723 sont les développeurs de logiciel d'impression 3D qui sont à l'origine de la grande  
724 diversité des formats de fichiers. En effet, chacun d'entre eux produit son propre  
725 format de fichier de modélisation 3D. Les entreprises productrices d'imprimantes  
726 3D ne sont donc pas les seules responsables du manque d'uniformisation dans ce  
727 domaine. Dans une moindre mesure, nous constatons le même problème avec la  
728 résolution selon les axes XY. Celle-ci est définie, suivant les imprimantes et les  
729 entreprises constructrices, par 4 unités différentes à savoir: le micron, le pixel, le  
730 DPI et le DPI carré (Tableau 3). Bien qu'il existe 4 unités différentes, 3 d'entre elles  
731 (le pixel, le DPI et le DPI carré) ne représentent que 5% des imprimantes 3D alors  
732 que le micron est utilisé par 48% des imprimantes. Cependant cette information  
733 essentielle est manquante sur le site web des entreprises constructrices pour 47% des  
734 imprimantes 3D. Le besoin de différenciation des entreprises entre elles nuit à la  
735 compréhension du monde de l'impression 3D. Il serait intéressant que les entreprises  
736 constructrices s'accordent entre elles afin d'uniformiser au maximum leurs fiches  
737 techniques. Cela faciliterait le choix du consommateur et permettrait une  
738 comparaison plus complète entre toutes les imprimantes 3D vendues sur le marché.  
739 Il serait intéressant de regrouper les différentes technologies d'impression 3D par  
740 famille en se basant sur le travail fourni par l'ancien comité F42 pour établir une  
741 nouvelle classification adaptée au marché actuel des imprimantes 3D [13]. Les  
742 entreprises pourraient mettre prioritairement en avant, sur leur site web constructeur,  
743 la famille de procédé d'impression utilisée plutôt que le nom précis de leur  
744 technologie. Deux familles seraient alors majoritaires: la famille FFF/FDM et la  
745 famille DLP/SLA qui regrouperaient respectivement 44% et 38% des imprimantes  
746 3D (25µm).

747 Nous conseillerions également d'utiliser une vitesse et non un débit pour caractériser  
748 la vitesse d'impression 3D. Si une unité devait être retenue en priorité, nous  
749 retiendrions le « mm/s » car celui-ci, en plus d'être déjà utilisé par 29% des

750 imprimantes (Tableau 7), est facilement compréhensible par le plus grand nombre  
751 d'utilisateurs, au contraire d'une unité de débit ou d'une unité qui est basée sur les  
752 couches.  
753 Enfin, il est plus difficile de se prononcer sur la méthode à privilégier pour  
754 homogénéiser les formats de fichier d'impression 3D. En effet, il existe des formats  
755 plus complexes que d'autres. Certains, comme le format « .ply » permettent de gérer  
756 une impression 3D en couleurs. D'autres, comme le format « .obj », peuvent  
757 supporter des formes géométriques très complexes. Le format « .stl » ne permet ni  
758 l'un ni l'autre. Il serait néanmoins intéressant de: 1) réduire le nombre de formats de  
759 fichiers d'impression 3D existants, 2) augmenter la compatibilité des imprimantes  
760 3D avec les formats de fichiers les plus communs (comme le .stl, le .obj, le .slc, le  
761 .3ds, le .ply ou le .amf), déjà présents sur le marché, 3) proposer un nouveau format  
762 de fichier de modélisation 3D qui serait universel et qui permettrait de remplacer le  
763 format « .stl », car celui-ci souffre de nombreux défauts liés à son âge (datant des  
764 débuts de l'impression 3D dans les années 90).

### Etendue des informations non communiquées

765 Pour chacune des imprimantes 3D recensées dans ce travail, nous avons étudié 16  
766 caractéristiques techniques en collectant les informations sur les sites Internet des  
767 entreprises constructrices. Nous avons remarqué l'étendue du manque d'information  
768 disponible sur les sites web. La rareté des informations disponibles concernait  
769 principalement 6 de ces 16 caractéristiques, à savoir: 1) le type de calibrage, 2) la  
770 vitesse d'impression, 3) le prix, 4) le service après-vente, 5) la garantie ainsi que 6)  
771 les matériaux qui sont pris en compte par l'imprimante 3D.  
772 En ce qui concerne le calibrage, 60% des imprimantes 3D (25µm) ne mentionnent  
773 pas si celui-ci est automatique, semi-automatique ou manuel (Tableau 6). Le  
774 calibrage automatique reste le plus fiable et le plus facile pour un utilisateur lambda.  
775 Concernant les vitesses d'impression, nous n'avons pas trouvé des informations à ce  
776 sujet pour 53% des imprimantes 3D (25µm) (Tableau 7). Pour le prix de  
777 l'imprimante 3D, celui-ci n'est pas mentionné sur le site de l'entreprise dans 68%  
778 des cas (Tableau 15). Les informations liées à la garantie et au service après-vente  
779 ne sont pas disponibles pour, respectivement, 56% et 52% des imprimantes 3D  
780 (Tableaux 20, 21). De plus, 55% des imprimantes 3D ne mentionnent pas si elles  
781 sont compatibles avec des matériaux provenant d'une entreprise extérieure à  
782 l'entreprise constructrice (Tableau 9). La caractéristique à propos de laquelle il est  
783 le plus difficile de récolter des informations, est la possibilité ou non d'utiliser des  
784 matériaux biocompatibles avec l'imprimante 3D. Pour 77% des imprimantes 3D les  
785 informations concernant la biocompatibilité des matériaux utilisés sont manquantes  
786 (Tableau 10). Ce manque d'information rend difficile la comparaison entre les  
787 imprimantes 3D (25µm) que nous avons référencées.  
788



### **Manque de précision de certaines caractéristiques techniques**

789 La vitesse d'impression maximale des imprimantes 3D et leur prix sont les deux  
790 caractéristiques principales pour lesquelles les informations disponibles sont les  
791 moins précises. Concernant la vitesse d'impression maximale, les valeurs fournies  
792 par les entreprises constructrices sur leur site Internet sont imprécises. Aucune  
793 d'entre elles ne signale la méthode utilisée pour déterminer cette vitesse. Pourtant,  
794 trois facteurs importants influençant la vitesse d'impression devraient être  
795 mentionnés: l'épaisseur de couche, la résolution selon les axes XY et le type de  
796 matériau avec lequel le test de vitesse a été effectué. Sans ces informations, il est  
797 impossible d'estimer une vitesse moyenne d'impression pour chaque famille de  
798 procédés d'impression. Il serait opportun que les entreprises fournissent, sur leur site  
799 Internet, toutes les données relatives à la manière utilisée pour déterminer la vitesse  
800 d'impression mentionnée.

801 En ce qui concerne le prix des imprimantes 3D, celui-ci n'est pas disponible sur le  
802 site des entreprises constructrices dans 68% des cas (Tableau 16). Lorsqu'un prix est  
803 disponible, l'entreprise constructrice ne mentionne pas, dans 59% des cas, si le prix  
804 est calculé avec ou sans taxes (Tableau 19). Cela peut entraîner des différences de  
805 prix considérables, notamment en Belgique, où le taux de TVA hors produit de  
806 première nécessité est fixé à 21%. Il serait utile que les entreprises  
807 précisent systématiquement à côté du prix de vente si les taxes sont comprises ou  
808 non afin d'éviter d'induire en erreur un potentiel acheteur lorsqu'il compare les prix  
809 de plusieurs imprimantes 3D.

### **Difficultés rencontrées lors de la communication avec nos interlocutaires**

812 D'abord il ne fut pas aisé de trouver un canal de communication adéquat pour  
813 discuter avec les entreprises constructrices. Lors de notre recherche d'imprimantes  
814 3D, et lors de notre prise de contact avec les firmes, nous avons privilégié l'envoi  
815 d'un e-mail. Si une adresse e-mail n'était pas clairement mentionnée, nous avons  
816 utilisé les formulaires de contact disponibles sur les sites constructeurs. Ces  
817 formulaires étaient, pour certains, fastidieux à remplir ou nécessitaient de créer un  
818 identifiant sur le site, sans garantie de succès. Certaines réponses automatiques ne  
819 contenaient pas les informations demandées. Lors de nos investigations, nous avons  
820 aussi reçu de nombreux e-mails publicitaires (235 en moins d'un an). Cela  
821 correspond à plus d'un courrier électronique publicitaire tous les deux jours. Sachant  
822 qu'un grand nombre de ces publicités arrivait également dans la partie  
823 « indésirable » de notre boîte e-mail, le nombre total de publicités était sans doute  
824 bien supérieur à ce que nous avons pu recenser. Pour cette raison, nous conseillons  
825 de ne pas utiliser son adresse e-mail personnelle lors de la recherche d'une  
826 imprimante 3D, sous peine d'être débordé par une masse de publicités non désirées.  
827 Il serait plus avisé d'utiliser son adresse e-mail professionnelle (voire de créer une  
828 adresse spéciale à cet effet) et de se désabonner des « newsletters » dès le premier

829 e-mail reçu.

830 Certaines entreprises exigeaient un entretien téléphonique pour poursuivre la

831 discussion. Cela n'était pas réalisable dans le cadre de notre recherche vu le grand

832 nombre d'entreprises à contacter et vu leur localisation géographique sur plusieurs

833 continents. En effet, la grande majorité des firmes constructrices sont implantées en

834 dehors de la Belgique. Cela ne serait certainement pas réalisable non plus pour un

835 dentiste indépendant dont l'horaire est déjà fortement chargé. Outre les réponses par

836 e-mail et les demandes de discussions téléphoniques, 8 entreprises sur 87 nous ont

837 également contactés via les réseaux sociaux (Facebook et Twitter).

838 Ensuite, concernant la rapidité et la qualité des réponses obtenues, nous avons

839 observé (Tableau 24) que 52 entreprises constructrices (sur un total de 87) nous ont

840 apporté une réponse par e-mail dans un délai de maximum 30 jours. Parmi ces 52

841 réponses, 43 ont été obtenues dans les trois jours. Les courriers électroniques

842 semblent donc être un moyen de communication relativement rapide. Cependant,

843 dans 13% des cas, la réponse nous a été fournie par un revendeur et non par un

844 salarié de l'entreprise constructrice (Tableau 23). De plus, au cours des échanges par

845 e-mail, nous avons eu, dans 1/3 des cas, des contacts avec plusieurs interlocuteurs

846 différents pour une même entreprise (Tableau 25). Dans certaines situations, cela

847 nous a obligés de répéter plusieurs fois nos questions et nos demandes d'échantillon.

848 Nos discussions ne nous ont pas permis d'établir de lien entre la rapidité d'une

849 réponse et la qualité de celle-ci. Par exemple, Microlay nous a fourni une réponse en

850 moins de 24 heures via un e-mail personnalisé et contenant toutes les informations

851 nécessaires. Par contre, nous avons attendu 11 jours la réponse de Fabmaker pour

852 finalement recevoir un e-mail automatique ne répondant en rien à notre demande.

853 Inversement, TMTCW nous a envoyé un e-mail dans la journée mais celui-ci ne

854 contenait aucune information utile alors que l'entreprise German RepRap nous a

855 fourni une réponse très complète mais celle-ci est arrivée dix jours après notre

856 demande de contact.

857 Une autre des barrières rencontrées lors de nos communications a été celle de la

858 langue. Par exemple, nous nous sommes retrouvés face à l'impossibilité de

859 continuer une discussion avec une entreprise (TMTCTW) car celle-ci nous avait

860 exclusivement répondu en chinois. Cependant, il est important de noter que la non-

861 connaissance du chinois n'entraîne pas une grande perte d'information. En effet, une

862 seule firme constructrice nous a contacté dans cette langue. Par contre, la perte

863 d'information aurait été beaucoup plus importante si nous n'avions pas maîtrisé

864 l'anglais, car 83% des réponses nous sont parvenues dans cette langue (Tableau 25).

865 C'est pourquoi, une bonne connaissance de l'anglais nous semble indispensable

866 pour maximiser la recherche d'informations au sujet des imprimantes 3D.

867 Nous avons aussi constaté que l'obtention d'un échantillon personnalisé gratuit

868 n'était pas aussi simple qu'indiqué sur certains sites web constructeurs. En effet,

869 seulement 59% des entreprises contactées à ce sujet ont accepté de nous envoyer cet

870 échantillon (Tableau 27). En moyenne, nous avons dû échanger 6 e-mails et attendre

871 plus d'un mois pour avoir une réponse favorable à notre demande. De plus, dans

872 60% des cas, il a été nécessaire de relancer nos interlocuteurs car ceux-ci avaient

873 arrêté de nous répondre.

874           Finalement, nous avons constaté un désintérêt de certaines entreprises par rapport à  
875 nos démarches. Tout d'abord, seules 61% des entreprises constructrices ont répondu  
876 à notre premier e-mail de contact (Tableau 1). Cela signifie que 4 entreprises sur 10  
877 se sont désintéressées d'un probable futur client et n'ont pas pris le temps de  
878 répondre à un e-mail court et précis ne demandant que quelques informations  
879 basiques. Il faut ajouter à cela que, parmi les 61% de réponses, certaines étaient non  
880 conformes à nos attentes de client potentiel. Par exemple, l'entreprise chinoise  
881 TMTCW n'a aucunement répondu à nos questions et s'est contentée de nous  
882 signaler qu'ils étaient contents de nous connaître et qu'ils pensaient effectivement  
883 que les dentistes avaient besoin d'utiliser les dernières technologies existantes. Suite  
884 à la teneur de ce premier e-mail reçu, nous n'avons pas continué la conversation. Par  
885 ailleurs, plusieurs autres réponses (comme celles des entreprises 3D Facture, Kent-  
886 strapper, Carbon 3D ou encore du revendeur officiel de la firme BQ, Charlie's 3D  
887 Technologie) nous ont paru trop familières pour un premier contact avec un  
888 consommateur potentiel. D'autres entreprises (M3D, Fusion 3D et Kora) semblaient  
889 manquer de temps pour nous répondre et nous ont renvoyés vers leur site Internet  
890 afin de trouver les informations demandées. Parfois, certains de nos interlocuteurs  
891 semblaient manquer aussi de connaissances. Par exemple, l'équipe de support de  
892 l'entreprise Sprintray nous a fourni des informations concernant les dimensions  
893 d'impression de l'imprimante 3D alors que nous attendions une réponse à propos du  
894 type de calibrage du plateau de l'imprimante 3D.  
895 Même lors de nos contacts avec des entreprises de premier plan dans le monde de  
896 l'impression 3D, nous n'avons pas été complètement satisfaits. En effet, le  
897 revendeur officiel pour le Benelux de l'entreprise Stratasys, leader mondial de  
898 l'impression 3D, a répondu à nos questions dans un français très approximatif, ce  
899 qui a compliqué les discussions. Un dentiste pourrait percevoir ces mauvaises  
900 formulations de phrases et fautes de frappe/d'orthographe comme un manque de  
901 sérieux. L'entreprise 3D Systems, numéro 3 mondial de l'impression 3D, fait partie  
902 des 40% d'entreprises à n'avoir jamais répondu à notre e-mail. Il faut noter aussi  
903 que toutes nos conversations n'ont pas pu aboutir car 9 entreprises constructrices ont  
904 décidé de mettre un terme prématuré à notre conversation. Par exemple Digital Wax  
905 System a bloqué notre adresse e-mail nous considérant comme « indésirables ».  
906 Le peu d'implication de certaines entreprises dans leur réponse au client nous a  
907 interpellé lorsque nous avons analysé le nombre d'échantillons reçus. Au total,  
908 seules 25 entreprises ont maintenu une discussion avec nous après que nous leur  
909 ayons demandé un échantillon gratuit. Vingt d'entre-elles ont accepté de nous  
910 envoyer l'échantillon demandé. Finalement, nous n'en avons reçu que 14. Parmi  
911 ceux-ci il n'y en avait que 9 échantillons conformes à notre demande (Tableau 1).  
912 Cela signifie que plus de la moitié des échantillons que nous avons reçus n'étaient  
913 pas conformes aux cahier de charges que nous avons fixé à notre interlocuteur. Les  
914 exemples les plus frappants étaient liés à l'entreprise Ilios et au revendeur de la  
915 firme Volumic. Ilios nous a fourni un échantillon ne correspondant pas au monde  
916 dentaire. Nous avons reçu de sa part un prototype de bijou en résine. Le revendeur  
917 de Volumic nous a envoyé par deux fois des échantillons incorrects au niveau de  
918 l'épaisseur de couche demandée. Lorsque nous lui avons signalé pour la deuxième

919 fois son erreur, il nous a répondu qu'il ne comptait pas nous envoyer un échantillon  
920 en 25 microns car il nous avait déjà offert « gracieusement » deux  
921 échantillons.

## 922 **Evolution dynamique du monde de l'impression 3D**

923 Le marché de l'impression 3D se trouve en perpétuel mouvement. Dans ce travail,  
924 nous avons répertorié 1037 imprimantes 3D jusqu'au 28 février 2017 puis nous  
925 avons continué à étudier uniquement les 211 imprimantes 3D (25µm). A cette date,  
926 ces 211 imprimantes 3D étaient commercialisées par 87 entreprises différentes.  
927 En un an, 66 imprimantes sur 211 recensées n'étaient déjà plus commercialisées  
928 (Tableau 30). Certains modèles 3D ont évolué, comme l'imprimante 3D « Model  
929 16A » de Hyrel 3D qui est devenue « The Hydra ». D'autres imprimantes 3D ne se  
930 retrouvent plus sur le marché car l'entreprise a totalement renouvelé sa gamme de  
931 produits. Par exemple, les imprimantes 3D « Pico » et « Pico Plus » d'Asiga ont été  
932 remplacées par les « Max », « Pico 2 » et « Pico 2 HD ». Un an après le début de  
933 notre recherche, seules 69% des imprimantes 3D que nous avons référencées sont  
934 toujours commercialisées (Tableau 30). En parallèle, en un peu plus d'un an, 13%  
935 des 87 entreprises ont disparu du web (Tableau 31). Ces firmes  
936 commercialisaient 9% des imprimantes 3D (25µm) disponibles en février 2017. Cela  
937 signifie qu'en un an, 9% des modèles d'imprimantes 3D (25µm) ont perdu leur  
938 service après-vente. En effet, si l'entreprise constructrice n'existe plus, il sera très  
939 difficile pour le consommateur lambda de trouver des conseils en cas de panne ou  
940 des pièces de rechange pour son imprimante 3D.  
941 L'impression 3D est actuellement à la mode. Les tutoriels d'explications autour de  
942 cette technologie fleurissent sur Internet, et principalement sur Youtube, avec près  
943 de 3 millions de vidéos traitant d'impression 3D. Il n'est donc pas surprenant de voir  
944 des projets de financement participatif se développer autour des imprimantes 3D  
945 (Tableau 22). Cependant, bien que 70% des financements participatifs référencés  
946 aient permis de financer le lancement d'une imprimante 3D (25µm), seules 40% de  
947 ces imprimantes 3D sont encore disponibles à la vente un an plus tard. Il est  
948 important de noter que seulement 40% des entreprises lancées par financement  
949 participatif sont encore en activité contre 94% des entreprises à modèle de  
950 financement classique.

## 951 **Imprimante 3D idéale en dentisterie**

952 Suite à notre recherche, nous avons essayé de déterminer les spécificités  
953 techniques qui nous semblent les plus pertinentes pour une imprimante 3D destinée  
954 à un usage dentaire.  
955 Tout d'abord, l'imprimante 3D devrait avoir la capacité de produire des couches  
956 d'une épaisseur égale ou inférieure à 25µm. Cela ne représente que 20% des 1037  
957 imprimantes 3D (Tableau 2). Il faudrait aussi réaliser une validation scientifique de  
958 cette précision d'épaisseur de couche, de manière indépendante, à travers une

959 publication dans une revue avec le comité de lecture. Ensuite, concernant la  
960 résolution selon les axes XY, une résolution de 37 microns semble être acceptable.  
961 En effet, les scanners intra-oraux, permettant de réaliser des empreintes des arcades  
962 dentaires, fournissent des modèles 3D des arcades dentaires à imprimer et ont une  
963 précision, en moyenne, de 37 microns [14]. Il est aussi important que l'imprimante  
964 3D soit vendue assemblée. En effet, un dentiste n'a ni le temps ni les compétences  
965 requises pour monter à la perfection une machine de grande précision. Cette  
966 caractéristique est déjà présente pour une très large majorité des imprimantes 3D  
967 (Tableau 5). De plus, l'imprimante 3D idéale devrait posséder un calibrage  
968 automatique. Celui-ci demande moins de connaissances techniques et offre un gain  
969 de temps au praticien par rapport aux autres types de calibrage (manuel ou semi-  
970 automatique). Cette caractéristique est rencontrée par seulement 27% des 211  
971 imprimantes 3D recensées (Tableau 6).

972 A propos de l'environnement d'impression 3D, celui-ci devrait obligatoirement être  
973 fermé. En effet, un environnement d'impression clos permet à l'imprimante 3D de  
974 profiter d'une température plus stable tout au long de l'impression et diminue les  
975 risques d'accidents. Certaines parties de l'imprimante 3D peuvent chauffer pendant  
976 l'impression à des températures supérieures à 200 °C. L'impression 3D dans un  
977 milieu fermé permet également de diminuer le nombre de nano-particules relâchées  
978 dans l'air, celles-ci étant connues pour provoquer des pathologies respiratoires à  
979 long terme. Il est aussi avéré que certains matériaux (ex : ABS) libèrent, en  
980 chauffant, des composés volatils cancérigènes (comme le styrène). Nous  
981 conseillons donc, comme sécurité supplémentaire, de placer l'imprimante 3D  
982 dans une pièce bien aérée [15]. Les imprimantes 3D (25µm) fermées représentent  
983 74% des modèles proposés à la vente.

984 Il est nécessaire d'acquérir un plateau d'impression chauffant en cas d'achat  
985 spécifique d'un modèle d'imprimante 3D fonctionnant par un procédé d'impression  
986 FFF/FDM. En effet, la surface chauffée du plateau maintient la partie imprimée à la  
987 température adéquate, ce qui assure une adhésion correcte entre les différentes  
988 couches et limite le risque de gauchissement de la pièce au moment de son  
989 refroidissement [16]. Actuellement, 68% des imprimantes FFF/FDM possèdent un  
990 plateau chauffant.

991 En ce qui concerne la vitesse d'impression, plus l'imprimante 3D est capable  
992 d'imprimer rapidement, plus elle sera utile et offrira un panel d'utilisations plus  
993 important pour un clinicien. La vitesse d'impression idéale ne peut être calculée que  
994 par rapport à l'utilisation qu'en prévoit le praticien. Si le praticien souhaite produire  
995 des couronnes provisoires à placer directement au fauteuil, la vitesse de son  
996 imprimante 3D devra être supérieure à celle d'un praticien utilisant son imprimante  
997 pour fabriquer des gouttières ou des onlays/inlays. Ensuite, nous estimons que  
998 l'imprimante 3D idéale devrait pouvoir imprimer au moins une arcade dentaire  
999 complète. Cela représente une dimension d'impression de 58x37 mm. Au total, 93%  
1000 des imprimantes référencées ont les dimensions minimales pour permettre ce type  
1001 d'impression (Tableau 8). Il serait aussi intéressant d'utiliser des matériaux ne  
1002 provenant pas exclusivement de l'entreprise constructrice. Ceci permet une plus  
1003 grande liberté dans le choix des matériaux et permet d'établir une concurrence au

1004 niveau des prix. Seules 22% des imprimantes 3D (25µm) présentent la capacité  
1005 d'utiliser aussi des matériaux non commercialisés par la firme productrice (Tableau  
1006 9). L'autre point important à propos des matériaux est la capacité de l'imprimante  
1007 3D idéale d'utiliser des matériaux biocompatibles. Cependant, parmi les  
1008 imprimantes 3D décrites comme permettant un usage dentaire et médical, seulement  
1009 22% permettaient l'usage de matériaux biocompatibles (Tableau 10).  
1010 Concernant le poids et les dimensions, l'imprimante 3D ne devrait pas dépasser une  
1011 masse de 25 kg pour permettre une manutention aisée (Tableau 12). Cela ne  
1012 représente que 32% des imprimantes 3D que nous avons étudiées. Pour pouvoir être  
1013 facilement déplacée, l'imprimante 3D ne doit pas excéder une largeur de 63 cm et  
1014 une hauteur de 200 cm. Ces dimensions permettent facilement de manœuvrer  
1015 l'imprimante 3D à travers une porte standard. Une majorité des imprimantes 3D  
1016 (57%) présente des dimensions égales ou inférieures à ces valeurs (Tableau 11).  
1017 Nous conseillons d'utiliser, avec l'imprimante 3D idéale, un ordinateur utilisant  
1018 Windows. En effet, les systèmes d'exploitations produits par Microsoft paraissent  
1019 être plus souvent compatibles que ceux produits par Linux ou Apple. Il est important  
1020 de noter que Windows est compatible avec 73% des imprimantes 3D (Tableau 13).  
1021 Dans un même souci de compatibilité, l'imprimante 3D devrait également accepter  
1022 le format de fichier de modélisation 3D « .stl » qui reste, à ce jour, le plus répandu.  
1023 Ce format peut être lu par 55% des imprimantes 3D (Tableau 14).  
1024 Idéalement l'imprimante 3D devrait coûter en moyenne 3661€ pour une technologie  
1025 FFF/FDM. S'il s'agit d'une technologie d'impression SLA/DLP, le prix devrait  
1026 osciller autour de 4292€ (Tableaux 16, 17).  
1027 Au sujet du service après-vente, celui-ci devrait idéalement être assuré par  
1028 l'entreprise constructrice et non par un revendeur. La firme ayant produit  
1029 l'imprimante 3D est la plus apte à répondre à tous les problèmes que le  
1030 consommateur pourrait rencontrer. Seulement 46% des entreprises assurent elles-  
1031 mêmes le service après-vente (Tableau 20).  
1032 La garantie légale en Belgique est de deux ans. Nous conseillons donc, au vu du prix  
1033 d'achat et du fonctionnement des imprimantes 3D, d'acheter une machine de  
1034 fabrication additive que si la garantie de fabrication est de deux ans ou plus.  
1035 Seulement 4% des imprimantes 3D proposent une couverture garantie de 2 ans sur le  
1036 site Internet constructeur (Tableaux 20, 21).  
1037 Finalement, il paraît préférable d'acheter une imprimante 3D issue d'un système de  
1038 financement classique plutôt que participatif. En effet, sur une période d'environ un  
1039 an, 60% des entreprises ayant produit une imprimante 3D grâce au financement  
1040 participatif ont disparu du marché. Ce taux chute à 13% en considérant toutes les  
1041 entreprises référencées dans cette recherche (Tableaux 22, 31).

#### 1042 **Entreprise-partenaire idéale**

1043 Sur base de nos échanges avec 53 entreprises, nous pouvons dégager quelques  
1044 caractéristiques pour rendre la discussion constructive.

1045 Tout d'abord, il est préférable d'être en contact avec un salarié de l'entreprise plutôt  
1046 qu'avec un revendeur. En effet, un revendeur est avant tout axé sur l'aspect  
1047 commercial et moins sur les connaissances techniques du monde de l'impression  
1048 3D. Lorsque nous contactons une entreprise, nous pouvons espérer recevoir des  
1049 informations techniques plus précises car nous allons échanger avec les concepteurs  
1050 ou au moins avec une personne formée aux imprimantes 3D produites par la firme.  
1051 Les entreprises constructrices répondent sans intermédiaire dans 87% des cas  
1052 (Tableau 23). Un délai de réponse est considéré de notre point de vue comme  
1053 acceptable s'il n'excède pas 3 jours. En effet, 83% des interlocuteurs nous ont  
1054 répondu dans ce laps de temps (Tableau 24). Il est souhaitable de réduire au  
1055 maximum le nombre d'interlocuteurs lors des échanges. En effet, nous avons  
1056 quelques fois été confrontés à une perte d'information liée à un nouveau  
1057 interlocuteur qui n'était pas au courant de qui nous étions et de ce que nous  
1058 voulions. Dans 70% des cas, nous n'avions eu qu'un seul correspondant (Tableau  
1059 26).

1060 Il est important qu'une entreprise envoie gratuitement un échantillon personnalisé,  
1061 avec une épaisseur de couche donnée. Cette demande simple permet de se faire un  
1062 premier avis sur la qualité de la réponse de l'entreprise à nos demandes spécifiques  
1063 et sur la qualité des impressions 3D possibles avec l'imprimante 3D souhaité. Pour  
1064 éviter les déconvenues, il est préférable de demander à la firme de confirmer que  
1065 l'échantillon envoyé vient bien de l'imprimante 3D demandée ainsi que de  
1066 confirmer l'épaisseur souhaitée. Au sujet du délai de réponse à notre demande  
1067 d'échantillon, nous avons eu besoin, en moyenne, de 6 échanges d'e-mails, étalés  
1068 sur un peu plus d'un mois, ce qui nous semble acceptable (Tableau 28).

1069 Finalement, l'entreprise est aussi « idéale » si le premier échantillon reçu est  
1070 similaire à l'échantillon demandé, ce qui n'arrive que dans 35% des cas (Tableau  
1071 29).

## 1072 **Limites de notre étude**

1073 Notre méthode de référencement comporte certaines limites car nous ne sommes  
1074 passés que par le moteur de recherche gratuit Google. La majorité de notre recherche  
1075 a été réalisée à partir de deux sites de référencements d'imprimantes 3D  
1076 accompagnée d'une recherche manuelle plus spécifique au niveau des imprimantes  
1077 3D à usage dentaire. Nos différentes phases d'exclusion des modèles d'imprimantes  
1078 3D étaient fortement influencées par les contacts que nous avons eu et par  
1079 l'expérience subjective de nos interlocuteurs, qui nous ont suggéré d'abandonner  
1080 divers modèles d'imprimantes 3D car non compatibles, d'après eux, pour la  
1081 dentisterie. Les sites Internet des entreprises constructrices n'étaient pas uniformes  
1082 dans leur présentation d'informations. Il est donc possible que nous n'ayons pas  
1083 trouvé des informations clés pour chacune des imprimantes 3D évaluées. En ce qui  
1084 concerne l'environnement d'impression 3D, quand l'information n'était pas présente  
1085 sous forme de texte sur le site Internet nous avons dû extrapoler le résultat en nous  
1086 basant sur les images et les vidéos présentes. Pour l'envoi des échantillons, nous

1087 n'avons pas considéré la possibilité que des échantillons soient envoyés mais qu'ils  
 1088 se soient perdus en route. Pour terminer, les informations au sujet des vitesses  
 1089 d'impression et des prix sur les sites Internet des constructeurs étaient peu précises,  
 1090 ce qui peut fausser les calculs que nous avons effectués avec ces données. Il faut  
 1091 ajouter à cela, que la conversion des prix en Euro en partant de USD américain, de la  
 1092 Livre Sterling ou du Zloty polonais s'est étalée sur plusieurs jours ce qui peut  
 1093 entraîner des variations minimales dans les taux de change.

## 1094 **Conclusions**

1095 Actuellement, aucune imprimante 3D commercialisée sur le marché mondial ne  
 1096 répond à l'ensemble de nos critères de recherche. En effet, aucune étude scientifique  
 1097 ne permet de valider le fait qu'une imprimante 3D grand public ait la capacité  
 1098 d'imprimer avec une épaisseur de couche de 25µm. L'imprimante 3D se rapprochant  
 1099 le plus de notre « imprimante 3D idéale » serait XD10 de MassPortal. Cette  
 1100 imprimante 3D répond à tous nos critères sauf, celui qui se rapporte à l'étude  
 1101 scientifique validant la capacité d'imprimer en 3D avec des couches de 25µm ou  
 1102 moins. Nous aurions pu dès lors recommander cette imprimante 3D si nous n'avions  
 1103 pas comparé les données que notre interlocuteur nous a envoyées lors de notre  
 1104 discussion et les données mises à jour sur le site Internet de l'entreprise. En effet,  
 1105 comme expliqué dans le matériel et méthode, l'imprimante XD10 nous a été  
 1106 proposée par notre interlocuteur car, au début de notre référencement en février  
 1107 2017, elle n'était pas encore commercialisée. En comparant la fiche technique  
 1108 envoyée par notre interlocuteur le 07.02.18 et celle présente sur le site internet de  
 1109 l'entreprise constructrice le 12.02.18, nous avons pu remarquer une forte différence  
 1110 au niveau de l'épaisseur de couche. Sur la fiche envoyée par notre interlocuteur,  
 1111 nous avons une épaisseur de couche minimale de 10 microns alors que le site  
 1112 Internet  
 1113 annonçait une épaisseur de couche minimale de 70 microns. Nous ne pouvons donc  
 1114 que conseiller au consommateur d'aller vérifier lui-même toutes les informations  
 1115 qu'il recevra même si elles proviennent directement d'un salarié de l'entreprise  
 1116 constructrice de l'imprimante.  
 1117 Pour résoudre en partie le manque de clarté dans le monde de l'impression 3D  
 1118 dentaire, nous proposons d'améliorer la lisibilité des sites Internet constructeurs.  
 1119 Nous pensons qu'en regroupant, sur une seule page du site constructeur, les  
 1120 caractéristiques importantes de l'imprimante 3D, une photographie de celle-ci, un  
 1121 lien pour permettre une demande d'échantillon personnalisé (si possible  
 1122 gratuitement) et une adresse e-mail pour rentrer en contact direct avec un  
 1123 intermédiaire compétent dans le domaine de l'impression 3D, nous améliorerions  
 1124 sensiblement la communication et les discussions fructueuses entre les clients  
 1125 (dentistes) et l'entreprise constructrice. Les caractéristiques à indiquer en priorité  
 1126 seraient : 1) famille de procédé d'impression 3D, 2) épaisseur de couche minimale  
 1127 (en micron), 3) étude scientifique validant l'épaisseur de couche minimale,



1128 4) résolution XY minimale (en micron), 5) type de calibrage, 6) environnement  
 1129 d'impression, 7) présence d'un plateau d'impression chauffant si le procédé  
 1130 d'impression est de la famille FFF/FDM, 8) vitesse d'impression maximale (en  
 1131 mm/s) avec un lien donnant le détail de l'épaisseur de couche utilisée, de la  
 1132 résolution XY utilisée et du matériau utilisé pour déterminer cette vitesse,  
 1133 9) dimensions de capacité d'impression (en mm), 10) capacité d'utiliser des  
 1134 matériaux ne provenant pas de l'entreprise constructrice, 11) capacité d'utiliser des  
 1135 matériaux biocompatibles, 12) poids (en kg) et dimensions de l'imprimante (en cm),  
 1136 13) systèmes d'exploitation compatibles, 14) types de fichier d'impression 3D  
 1137 compatibles, 15) gestion du service après-vente et la durée de la garantie, 16) prix,  
 1138 en indiquant si les taxes sont incluses ou non.

- 1140
- **Remerciements:** Ce travail a reçu le prix du meilleur mémoire de fin d'études, Master en sciences dentaires, UCLouvain, Bruxelles, Belgique, 2018
  - 1141
  - **Sources de financement:** ce travail n'a pas reçu de financement
  - 1142
  - **Conflits d'intérêt:** les auteurs déclarent qu'ils n'ont de conflit d'intérêt lié à ce travail
  - 1143
  - **Approbation éthique:** ce travail n'a pas nécessité d'accord de la commission d'éthique
  - 1144
  - **Consentement éclairé:** ce travail n'a pas nécessité de consentement éclairé
  - 1145
  - 1146
  - 1147

#### 1148 **Contribution des Auteurs :**

| Auteur      | Contribution  |
|-------------|---|
| François G  | Concept, Recherches, Méthodologie, Données, Supervision, Validation, Visualisation, Préparation de manuscrit, Ecriture-corrections et édition |
| Henriquet N | Concept, Recherches, Méthodologie, Données, Supervision, Validation, Visualisation, Préparation de manuscrit, Ecriture-corrections et édition |
| Xu BZ       | Concept, Recherches, Méthodologie, Données, Supervision, Validation, Visualisation, Préparation de manuscrit, Ecriture-corrections et édition |

1149

#### 1150 **References**

- 1151 1. Hull CW. Apparatus for production of three-dimensional objects by  
 1152 stereolithography. United States Patent 4575330, 1986.

- 1153  
1154 2. Deckard CR. United States Patent: 4863538 - Method and apparatus for  
1155 producing parts by selective sintering. United States Patent 4863538, 1989.  
1156  
1157 3. Crump SS. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. United  
1158 States Patent 5121329, 1992.  
1159  
1160 4. Olszewski R, Szymor P, Kozakiewicz M. Accuracy of three-dimensional, paper-  
1161 based models generated using a low-cost, three-dimensional printer. J  
1162 Craniomaxillofac Surg 2014;42:1847-1852.  
1163  
1164 5. Szymor P, Kozakiewicz M, Olszewski R Accuracy of open-source software  
1165 segmentation and paper-based printed three-dimensional models. J Craniomaxillofac  
1166 Surg 2016;44:202-209.  
1167  
1168 6. Kozakiewicz M, Szymor P, Olszewski R. Cytotoxicity of three-dimensional  
1169 paper-based models from a three-dimensional paper-based printer. Nemesis  
1170 2018;3:1-15. <https://doi.org/10.14428/nemesis.v3i1>  
1171  
1172 7. Jones R, Haufe P, Sells E, Iravani P, Olliver V, Palmer C, Bowyer A. RepRap –  
1173 The Replicating Rapid Prototyper. Robotica 2011;29:177–191.  
1174  
1175 8. Kabalnov AS, Wright JT, Kasperchik V. Three-Dimensional (3d) Printing.  
1176 World patent WO/2016/175748, 2016.  
1177  
1178 9. DeSimone JM, Ermoshkin A, Ermoshkin N, Samulski ET. Continuous liquid  
1179 interphase printing. United States Patent Application: 0150097315 A1, 2015.  
1180  
1181 10. Kale E, Seker E, Yilmaz B, Özcelik TB. Effect of cement space on the  
1182 marginal fit of CAD-CAM-fabricated monolithic zirconia crowns. J Prosthet Dent  
1183 2016;116:890–895.  
1184  
1185 11. Lombardo L, Coppola P, Siciliani G. Comparison of dental and alveolar arch  
1186 forms between different ethnic groups. Int Orthod 2015;13:462-488.  
1187  
1188 12. Lecomte I. Le règlement régional d'urbanisme.  
1189 [https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?dtype=services&doc=ILecomte\\_Regl](https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?dtype=services&doc=ILecomte_Regl)  
1190 [ement\\_Regional\\_Urbanisme.pdf&lang=fr](https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?dtype=services&doc=ILecomte_Regl), 2014  
1191  
1192 13. ASTM F2792-12a, Standard terminology for additive manufacturing  
1193 technologies' (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA,  
1194 2012, [www.astm.org](http://www.astm.org).  
1195  
1196 14. Ender A, Zimmermann M, Attin T, Mehl A. In vivo precision of conventional  
1197 and digital methods for obtaining quadrant dental impressions. Clin Oral Investig

- 1198 2016; 20:1495–1504.  
1199  
1200 15. Azimi P, Zhao D, Pouzet C, Crain NE, Stephens B. Emissions of Ultrafine  
1201 Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop  
1202 Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. Environ Sci Technol  
1203 2016;50:1260–1268.  
1204  
1205 16. Rictor A, Riley B. Optimization of a heated platform based on statistical  
1206 annealing of critical design parameters in a 3D printing application. 6th Int Conf  
1207 Sustain Energy Inf Technol SEIT-2016 Affil Workshop 2016;83:712–716.  
1208