

# Matériaux et impression 3D de pièces d'assemblage à échelle architecturale

Mathieu VENOT

Séminaire AMC2 / Transitions

Robert LEROY | Léda DIMITRIADI | Loïc COUTON

Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Malaquais

21 décembre 2015

## 1 Introduction

L'évolution et l'utilisation des nouvelles technologies en architecture remettent en question les méthodes de mise en œuvre existantes. Aujourd'hui, grâce aux outils de conception et fabrication numérique, la norme et le standard n'ont désormais guère de sens. Il est maintenant possible de concevoir des objets uniques à géométries complexes et variables, mais aussi de supplanter et optimiser certaines méthodes traditionnelles. Le découpage numérique de panneaux de bois et la préfabrication en sont des exemples, précision - rapidité - cout deviennent de plus en plus avantageux.

Parmi ces avancées en construction, des travaux ont été faits sur l'optimisation et l'adaptation des jonctions de pièces en bois (à la manière des assemblages traditionnels japonais<sup>1</sup>), pour pouvoir être réalisés par ces outils numériques (fraisage CNC 3 axes et/ou robotique industrielle<sup>2 3</sup>). D'autres travaux ont également porté sur l'assemblage de tasseaux de bois par des noeuds imprimés en 3D, dans le cas de la réalisation d'une structure<sup>4</sup>, type Gridshell par exemple<sup>5</sup>.

- 
1. W. GRAUBNER, 2003, Assemblages du bois : l'Europe et le Japon face a face, editions Vial
  2. <http://makezine.com/2012/04/13/cnc-panel-joinery-notebook/>
  3. <http://flexiblestream.org/project/50-digital-wood-joints>
  4. A. SANCHEZ SAMANO, 2014, Assemblages de bois appliquees a la robotique architecturale, memoire AMC2
  5. <http://www.txnmydesign.com/grid-shell.html>

17 Le potentiel d'utilisation de l'impression 3D pour la réalisation de pièces  
18 d'assemblages d'éléments est particulièrement intéressant en architecture.  
19 Cela permettrait plusieurs avantages comme :

- 20 — avoir des matériaux et fonctions multiples. Différentes solidités (ri-  
21 gide, flexible) et différents aspects (textures, couleurs).
- 22 — avoir des géométries et formes complexes. Pas de contraintes de fa-  
23 brication. Possibilité de faire du non-standard et sur-mesure.
- 24 — avoir des gains de temps. Pas besoin d'usiner chaque poutre indé-  
25 pendamment. Utilisation de pièces industrielles standards (poutres  
26 ou tasseaux normalisés par exemple). Fabrication automatisée, mul-  
27 tiple et simultanée, pas d'arrêt dans la chaîne de production (conti-  
28 nuité de la conception à la fabrication, notion de "File to Factory").
- 29 — avoir des couts moindres. Uniquement du temps machine (majori-  
30 tairement), sous-traitance et délocalisation possible, pas de perte de  
31 matière (principe même de la fabrication additive, dans notre cas  
32 "Fused Deposition Modeling").
- 33 — permettre le recyclage. Possibilité de réextruder, refondre la matière  
34 première (filament) à partir de pièces déjà réalisées.
- 35 — avoir des risques humains faibles. Moins de personnel, pas de mani-  
36 pulations lourdes et/ou d'outils dangereux.

37 La technologie étudiée ici est donc l'impression 3D par extrusion dite  
38 FDM/FFF pour "Fused Déposition Modeling / Fused Filament Fabrication"  
39 soit "Dépot de matière fondue / Fabrication par filament fondu".

40 Le choix de se concentrer sur cette technologie et non une autre, comme  
41 la Stéréolithographie (SLA) ou le Frittage laser (SLS), vient du fait qu'elle  
42 est actuellement la plus démocratisée dans le domaine de l'impression 3D,  
43 mais aussi et surtout la plus rapide, la moins couteuse, et la plus résistante  
44 en comparaison des autres technologies (à l'exception de la SLS métal mais  
45 pour ce dernier point uniquement).

46 L'impression 3D FDM se place avec un prix d'environ 1\$/cm<sup>3</sup>, contre  
47 3\$/cm<sup>3</sup> pour le frittage laser polymère, 6\$/cm<sup>3</sup> pour la stéréolithographie,  
48 et 64\$/cm<sup>3</sup> pour le frittage laser métal<sup>6</sup>. Elle permet également l'usage  
49 de multimatériaux simultanément, et ne requiert pas de post-traitement  
50 pour solidifier la pièce, les seuls points faibles étant une qualité de surface  
51 légèrement moins lisse et l'usage de supports additionnels pour des pièces  
52 en porte à faux.

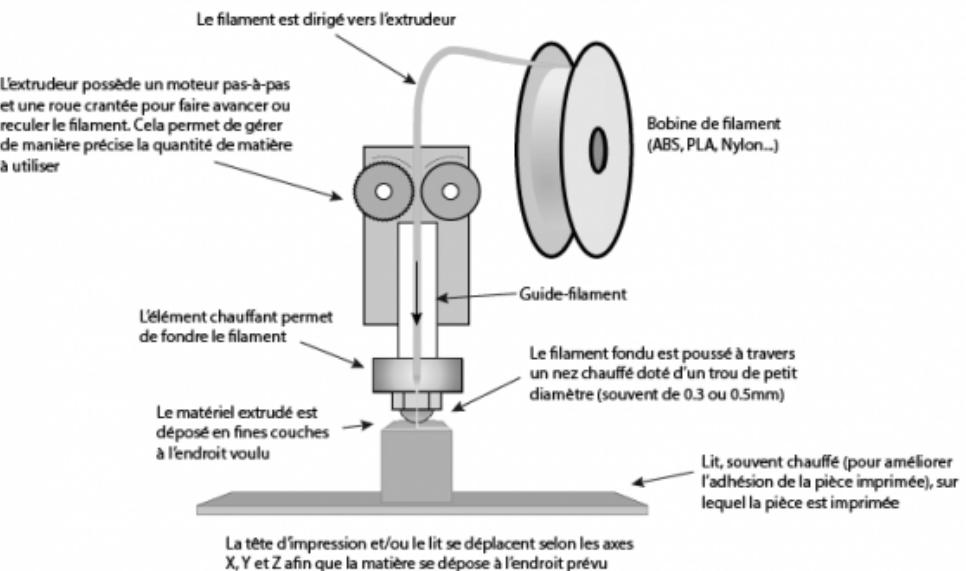
---

6. Tarifs Sculpteo France

Technology	Selective Laser Sintering					Fused Deposition Modeling				Projection (Objet)		Stereolithography	Wax 3D Printing	Wax 3D Printing + Molding	Direct metal laser sintering	Zcorp		
Material	Polyamide (Nylon)	Polished Polyamide (Nylon)	Glass-filled Polyamide	Carbon Fiber/Polyamide	PA FR	Alumide	ABS Plastic	PLA	PC	ULTEM	Photo polymer (Vero resins)	Photo polymer (Tango resins)	Epoxy Resins	Wax	Precious metals by wax casting (silver, gold, bronze)	Titanium	Stainless Steel	Mineral powder
Concept Model	X	X					X				X	X	X				X	
Design Verification	X	X				X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
Form, fit, function	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X			X	X	X	
Functional testing	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	
Fine feature detail	X	X					X				X	X	X	X	X	X	X	X
Smooth surface finish	X										X	X	X	X	X	X	X	
High heat / Chemical applications							X									X		
Manufacturing	X	X				X	X	X	X						X	X	X	
Medical applications	X	X																
Tooling (Molding)															X	X	X	
Semi-transparency															X	X		
Flexible	+	+	-															
Maximal Build dimensions (mm)	680 x 370 X 560	200 x 200 X 200	310 x 310 X 600	310 x 310 X 600	310 x 310 X 600	310 x 310 X 600	600 x 600 X 600	600 x 500 X 600	914 x 610 X 914	914 x 610 X 914	290 x 190 x 147	305 x 605 x 102	1500 x 750 x 500	80 x 45 x 80	80 x 45 x 80	250x 250 x 220	250x 250 x 220	254 x 381 x 203
Minimum wall thickness	0,8 mm	0,8 mm	1 mm	1 mm	0,8 mm	1 mm	1 mm	1 mm	0,8 mm	0,8 mm	2 mm	2 mm	2 mm	0,5 mm	0,5 mm	0,3 mm	0,3 mm	2 mm
Minimum detail	0,3 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,3 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,4 mm
Layer thickness	60 to 150 $\mu$	60 to 150 $\mu$	150 $\mu$	150 $\mu$	150 $\mu$	150 $\mu$	120 to 330 $\mu$	120 to 330 $\mu$	120 to 330 $\mu$	120 to 330 $\mu$	14 to 28 $\mu$	28 $\mu$	50 to 150 $\mu$	25 $\mu$	25 $\mu$	30 $\mu$	30 $\mu$	100 $\mu$

FIGURE 1 – Comparatif des technologies d'impression 3D (Sculpteo)

### Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D FFF(Fused Filament Fabrication)



Adapté de: <http://www.thingiverse.com/thing:29432> par edurobot.ch

FIGURE 2 – Fonctionnement d'une imprimante 3D FDM/FFF

53        Le principe de fonctionnement d'une imprimante 3D FDM est donc  
54        simple, une buse chauffante extrude un matériau thermoplastique sous  
55        forme de filament (souvent entre 170 et 260°C), qui se dépose ensuite en  
56        plusieurs couches (épaisseur entre 0.08 et 0.38mm) sur un plateau afin de  
57        composer au fur et à mesure la pièce finale.

58        Mais une question importante se pose maintenant :  
59        Quelle peut être la résistance de ces nœuds imprimés en 3D et leurs poten-  
60        tiels d'utilisation ?  
61        En matière d'impression 3D, les informations de résistances mécaniques et  
62        durées de vie des matériaux documentées sont toujours les caractéristiques  
63        propres du polymère utilisé. Aucun cas d'étude n'a réellement été porté sur  
64        un filament donné ou une pièce d'essai.

## 65           2 Expérimentation

66         Après ces observations et recherches préalables, l'objectif est de réaliser  
67         une série de tests sur des matériaux usuels d'impression 3D FDM et de  
68         tirer des conclusions quant à ces valeurs de résistances et leurs potentielles  
69         applications en architecture.

70         Ces tests se feront en deux temps, une première partie sur l'expérimen-  
71         tation physique avec les matériaux mêmes, puis une seconde sur les aspects  
72         logiciels et de parcours d'outil, méthodes de dépose de la matière.

73         N.B : En aucun cas la géométrie initiale (extérieure) de la pièce ne sera  
74         modifiée, seule la structure interne sera amenée à changer (induit par les  
75         réglages du logiciel de création de parcours d'outil, tels que le remplissage  
76         ou l'épaisseur des parois et/ou l'optimisation topologique).  
77         Les paramètres propres aux réglages d'impression (influence de l'épaisseur  
78         des couches, pourtours, densité et types du remplissage) ne seront pas tes-  
79         tés mais juste énoncés, car ont déjà fait l'objet d'une étude par une Start-Up  
80         partenaire ([my3dmatter.com](http://my3dmatter.com)). Partenariat entre 3DMatter<sup>7</sup>, l'ENSA Paris-  
81         Malaquais<sup>8</sup>, les Art & Métiers ParisTech<sup>9</sup>, et le Laboratoire PIMM<sup>10</sup>, no-  
82         tamment pour les essais de traction.

### 83           2.1 Expérimentations Physiques

#### 84           2.1.1 Choix des matériaux

85         La première étape consiste en l'analyse et le choix des matériaux d'im-  
86         pression 3D FDM à tester.

87         Les matériaux privilégiés sont :

- 88         — le PLA générique (Acide Polylactique) - Fusion 150°C / Transition vi-  
89         treuse 60°C
- 90         Matériau le plus répandu en impression 3D FDM, le moins coûteux  
91         (30\$/kg), facile à mettre en œuvre (faible rétraction), bonne adhé-  
92         sion entre couches, bonne précision dimensionnelle, et bonne fini-  
93         tion. L'inconvénient majeur est qu'il est biodégradable.

- 
- 7. <http://my3dmatter.com>
  - 8. <http://www.paris-malaquais.archi.fr/>
  - 9. <http://www.ensam.eu/>
  - 10. <http://pimm.paris.ensam.fr/>

- 94 — l' ABS générique (Acrylonitrile Butadiène Styrene) - Fusion 210°C //  
 95 Transition vitreuse 105°C  
 96 Matériau très répandu également (antérieur historiquement au PLA),  
 97 peu couteux (30\$/kg), mais maintenant mis de côté par rapport  
 98 au PLA. Nécessité d'un plateau chauffant, précision dimensionnelle  
 99 moindre à cause des rétractions, finition moindre due à une adhé-  
 100 sion entre couches faible. Son avantage reste malgré tout sa résis-  
 101 tance aux chocs.  
 102 — la fibre de Carbone (ColorFabb XT-CF20) - Fusion 220°C // Transi-  
 103 tion vitreuse 75°C  
 104 Nouveau matériau commercialisé depuis 2015 pour l'impression 3D  
 105 FDM par ColorFabb. Il est deux fois plus couteux que le PLA ou l'ABS  
 106 (60\$/kg), mais plus dense que les deux autres (1,35g/cm3), com-  
 107 posé de 20% de fibres de carbone, et surtout un module de flexion  
 108 deux fois plus grand que le PLA (6.2GPa). Il est également censé  
 109 avoir une plus grande résistance au feu et une durabilité plus impor-  
 110 tante que le PLA. Autrement il est aussi facile de mise en œuvre que  
 111 le PLA, possède une bonne adhésion entre couches, tout comme une  
 112 bonne précision dimensionnelle et une bonne finition.  
 113 — la fibre de Bois (ColorFabb WoodFill) - Fusion 195°C // Transition  
 114 vitreuse 55°C  
 115 Matériau commercialisé également par ColorFabb depuis 2014, il est  
 116 aussi plus couteux (60\$/kg), composé de 30% de fibres végétales.  
 117 En revanche, aucune information technique n'est fournie. La mise  
 118 en œuvre est semblable au PLA, mais la précision dimensionnelle et  
 119 la finition sont moins bonnes. L'intérêt étant l'aspect extérieur qui  
 120 rappelle celui du bois.<sup>11</sup>

Caractéristiques Matériaux	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	Wood (COLORFABB)
Transition vitreuse (°C)	60,00	105,00	75,00	55,00
Fusion (°C)	150,00	210,00	220,00	195,00
Prix (€)	30,00	30,00	60,00	60,00
Résistance	++++	+++	+++++	+
Précision	+++++	++	++++	+++
Finition	+++++	++	++++	++
Fabricant	Générique	Générique	ColorFabb	ColorFabb

FIGURE 3 – Récapitulatif des différents matériaux testés

---

11. Donnees constructeur ColorFabb & Wikipedia

## 2.1.2 Tests des matériaux

Afin de déterminer quel matériau peut être propice pour une application en architecture, chacun va passer une série de tests physiques pour déterminer ses propriétés de manière plus précise.

Les tests en question sont :

- des tests de traction.

Réalisés sur des éprouvettes normalisées, toutes obtenues et appliquées dans les mêmes conditions. Le premier essai sera une traction parallèlement au sens des fibres ( $0^\circ$ , traction longitudinale), un second perpendiculairement au sens des fibres ( $90^\circ$ , traction transversale), puis un troisième à  $45^\circ$  du sens des fibres.

- un test de fluage.

Les filaments sont pendus avec une masse à une extrémité pendant plusieurs mois dans le même environnement.

- des tests de durabilité.

Réalisés sur des éprouvettes normalisées également, et conditionnées dans des environnements différents et/ou contrôlés (Ultraviolets, immersion).

### Tests de traction suivant l'orientation des fibres -

Les tests sont tous réalisés sur une éprouvette normalisée. Chaque graphique des contraintes de traction présente également l'intervalle de confiance à 2 écarts types, qui regroupe ainsi 95% des données.

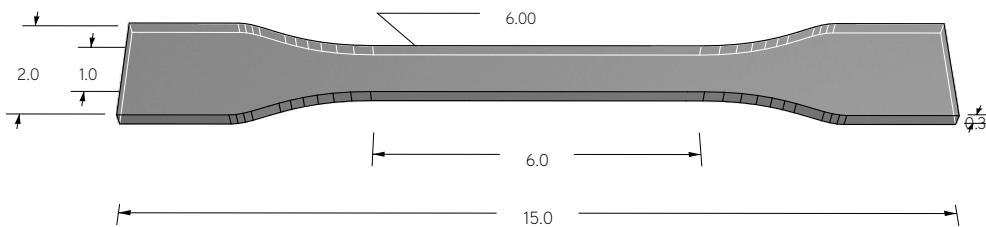


FIGURE 4 – Représentation de l'éprouvette normalisée (dimensions en mm)

144 Les réglages d'impression utilisés :  
 145 - Remplissage : 70% - linéaire  
 146 - Shells : 2 (0.8mm)  
 147 - Couches : 0.20mm  
 148 - Températures buse : 245°C (XT-CF20) - 220°C (PLA, ABS, WoodFill), Pla-  
 149 teau 110°C (ABS) - 60°C (XT-CF20, PLA, WoodFill)  
 150 - Vitesses : Extrusion 30mm/s, Déplacement 40mm/s  
 151 - Sans Raft, sans Supports  
 152 - Temps : 31min  
 153 - Poids : 6g (WoodFill) - 6.5g (PLA, ABS) - 7g (XT-CF20)

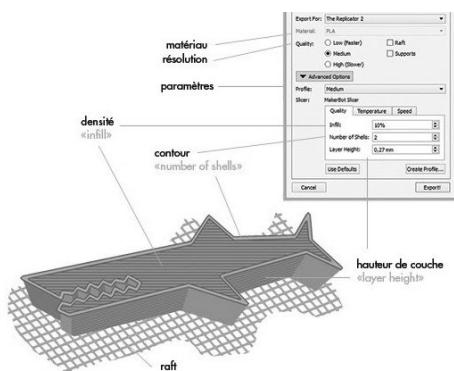


FIGURE 5 – Illustration des paramètres d'impression (LeFabShop)



FIGURE 6 – Photo des éprouvettes avant et après rupture aux tests (traction longitudinale)

154 Le tableau ci-dessous présente la moyenne de chaque matériau, réalisée  
 155 sur trois éprouvettes par matériau, soit un total de douze essais effectués  
 156 au laboratoire PIMM (Procédés Ingénierie en Mécanique et Matériaux) aux  
 157 Arts & Métiers ParisTech, en partenariat avec la Start-Up 3D Matter. La  
 158 traction se fait à raison de 0.6mm/min, avec une valeur toutes les 0.5s.

Traction Essai 1 : Sens 90°	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	Wood (COLORFABB)
Charge (N)	1109,020	693,606	997,040	459,956
Charge à limite élastique (N)	221,804	138,721	199,408	91,991
Contrainte maximale à rupture (MPa)	184,837	115,601	166,173	76,659
Contrainte de traction (MPa)	<u>36,967</u>	<u>23,120</u>	<u>33,235</u>	<u>15,332</u>
Contrainte de traction (Ecart type - MPa)	1,047	0,042	0,547	1,698
Contrainte de traction (Ecart type - %)	2,76	0,18	1,64	11,07
Déformation de traction (Déplacement %)	<u>2,254</u>	<u>3,781</u>	<u>2,676</u>	<u>1,870</u>
Déplacement de traction (mm)	<u>2,479</u>	<u>4,159</u>	<u>2,943</u>	<u>2,058</u>
Déplacement de traction (Ecart type - mm)	0,240	0,941	0,022	0,363
Déplacement de traction (Ecart type - %)	9,17	18,12	0,63	15,55
Module d'Young (GPa)	<u>3,158</u>	<u>1,643</u>	<u>3,260</u>	<u>2,015</u>
Temps à rupture (s)	<u>247,9</u>	<u>415,9</u>	<u>294,3</u>	<u>205,8</u>
Densité (kg/m³)	1210	1060	1370	1240
Coefficient de Poisson	0,36	0,35	?	?
Absorption d'eau (%)	?	0,7	?	?
Coefficient de dilatation thermique (*10^-6 K^-1)	?	80	?	?

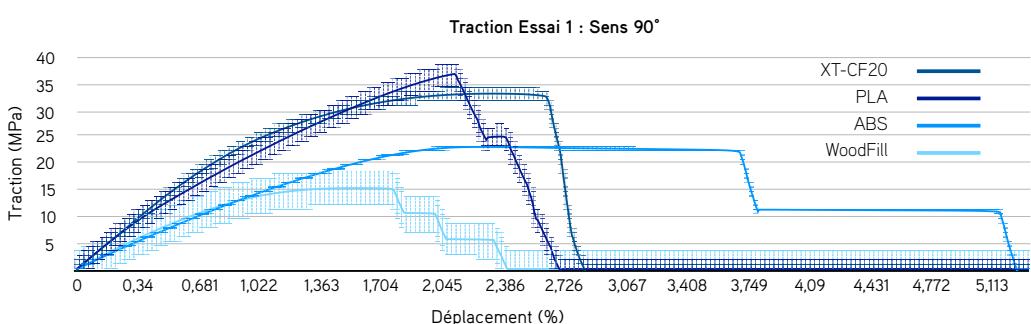


FIGURE 7 – Résultats du premier test de traction (traction longitudinale)

159 Ce premier test montre que le PLA se démarque plutôt bien, suivi par  
160 les fibres de Carbone (notamment au niveau du Module d'Young, où il le  
161 dépasse même, malgré une déformation un peu plus importante). L'ABS  
162 ne trouve quant à lui bien en retrait, avec une déformation bien plus im-  
163 portante avant rupture (seule sa capacité à résister au choc semble être un  
164 avantage, bien que ce paramètre n'ait pas été testé). Et les fibres de Bois,  
165 encore plus loin, avec une résistance moyenne deux fois moindre que le  
166 PLA ou les fibres de Carbone, mais une déformation moindre.  
167 En comparaison, nous avons des contraintes allant de 15 à 37 MPa, ce qui  
168 place ces matériaux dans les catégories des résineux courants (C18 à C30),  
169 pour la plupart dans les bois lamellés-collés (GL24 à GL32), et même au-  
170 dessus encore pour le PLA. En terme de module d'Young, allant de 1,6 à  
171 3,3 GPa, on se place bien dans la catégorie des polymères (Nylon, Epoxy,  
172 Polyamide...).

173 Le deuxième test de traction montre la résistance à l'arrachement des  
174 couches, la traction se fait perpendiculairement au sens des fibres.

175 Les éprouvettes, au lieu d'être imprimé à l'horizontale sur le plateau,  
176 sont imprimées verticalement.

177 L'aspect de surface est donc moins bon, et l'on peut voir distinctement les  
178 couches.



FIGURE 8 – Photo d'une éprouvette Carbone après rupture aux tests (trac-  
tion transversale)

179 Le tableau ci-dessous présente la moyenne de chaque matériau, réalisée  
180 dans les mêmes conditions que la série précédente.

Traction Essai 2 : Sens 0°	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	WOOD (COLORFABB)
Charge (N)	737,528	693,594	699,611	693,606
Charge à limite élastique (N)	147,506	138,719	139,922	138,721
Contrainte maximale à rupture (MPa)	122,921	115,599	116,602	115,601
Contrainte de traction (MPa)	24,584	23,120	23,320	23,120
Contrainte de traction (Ecart type - MPa)	0,608	0,052	2,678	0,052
Contrainte de traction (Ecart type - %)	2,44	0,22	10,72	0,22
Déformation de traction (Déplacement %)	1,908	2,272	1,508	2,249
Déplacement de traction (mm)	2,099	2,499	1,655	2,474
Déplacement de traction (Ecart type - mm)	1,152	1,152	1,152	1,152
Déplacement de traction (Ecart type - %)	23,42	23,42	23,42	23,42
Module d'Young (GPa)	2,563	1,656	2,182	1,969
Temps à rupture (s)	209,9	249,9	165,5	247,4
Densité (kg/m³)	1210	1060	1370	1240
Coefficient de Poisson	0,36	0,35	?	?
Absorption d'eau (%)	?	0,7	?	?
Coefficient de dilatation thermique (*10^-6 K^-1)	?	80	?	?

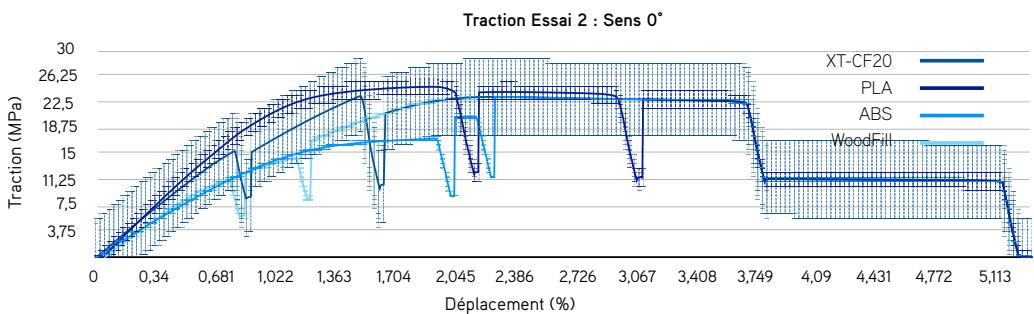


FIGURE 9 – Résultats du deuxième test de traction (traction transversale)

181 Ce deuxième test montre que le PLA se démarque aussi bien, suivi tou-  
182 jours par les fibres de Carbone (le Module d'Young étant cette fois-ci moins  
183 remarquable, mais une déformation nettement moins importante que tous  
184 les autres).

185 L'ABS ne trouve plus en retrait, avec en plus une déformation bien plus  
186 importante avant rupture, tout comme les fibres de Bois.

187 On remarque que la charge à rupture ne diffère que très peu entre les ma-  
188 tériaux lorsque l'on tire perpendiculairement au sens des fibres, seuls la  
189 déformation et donc le Module d'Young sont ici significatifs.

190 Ce deuxième test met bien en évidence que l'interface entre les couches  
191 d'impression crée une faiblesse. L'arrachement des couches suscite une  
192 perte de résistance d'environ 30% comparé à la traction dans le sens des  
193 fibres. A l'exception de l'ABS qui a naturellement une interface entre couches  
194 déjà faible, due à sa température de transition vitreuse plus importante.

195 Le troisième test montre une résistance intermédiaire, la traction se fai-  
196 sant à 45° du sens des fibres.

197 On remarque que l'impression est beaucoup plus difficile à réaliser sur  
198 les pentes à 45° pour les faibles largeurs et /ou épaisseurs. En résulte une  
199 plus grande fragilité évidente.



FIGURE 10 – Photo des éprouvettes PLA et fibres de Carbone (traction 45°)

200 Le tableau ci-dessous présente la moyenne de chaque matériau, réalisée  
201 dans les mêmes conditions que les séries précédentes.

Traction Essai 2 : Sens 45°	PLA (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)
Charge (N)	948,888	298,750
Charge à limite élastique (N)	185,324	60,010
Contrainte maximale à rupture (MPa)	158,148	49,792
Contrainte de traction (MPa)	30,887	10,002
Contrainte de traction (Ecart type - MPa)	0,827	1,612
Contrainte de traction (Ecart type - %)	2,68	16,12
Déformation de traction (Déplacement %)	5,266	2,146
Déplacement de traction (mm)	3,686	1,502
Déplacement de traction (Ecart type - mm)	0,696	0,587
Déplacement de traction (Ecart type - %)	18,88	39,07
Module d'Young (GPa)	0,915	0,858
Temps à rupture (s)	221,2	90,5
Densité (kg/m³)	1210,0	1370,0
Coefficient de Poisson	0,36	?
Absorption d'eau (%)	?	?
Coefficient de dilatation thermique (*10^-6 K^-1)	?	?

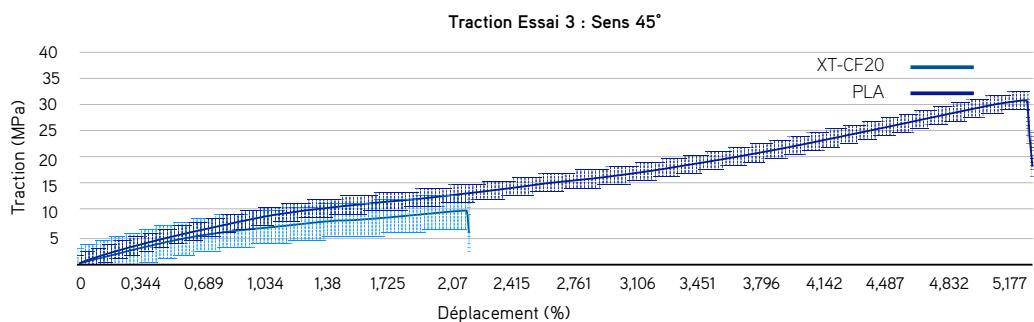


FIGURE 11 – Résultats du troisième test de traction (traction 45°)

202 Ce troisième test montre que le PLA travaille donc relativement bien  
 203 dans la plupart des cas de figure étudiés jusqu'à présent. Avec une traction  
 204 à 45°, on se place entre les 35MPa d'une traction longitudinale et les 25MPa  
 205 transverse, avec une moyenne de 30MPa à 45°. La perte est ici de 15% par  
 206 rapport à la traction longitudinale, alors qu'elle est de 30% pour la traction  
 207 transversale.

208 Les valeurs des éprouvettes carbone à 45° ne sont malheureusement  
 209 pas significatives à cause de l'état de surface après impression. Le modèle

210 physique étant beaucoup trop altéré comme nous voyons sur la photo (difficulté d'impression dans cette orientation) pour prendre ces résultats en  
211 compte. On suppose que si la qualité de l'éprouvette était similaire à celle  
212 du PLA, les valeurs seraient avoisinantes comme dans les cas précédents.  
213

214 **Test de fluage -**

215  
216 Le test est réalisé sur le filament de matière directement, avec une longueur initiale de deux mètres environ, pour 1.75mm de diamètre. Chaque  
217 filament est lesté avec un poids de 1.5kg, soit au tiers de sa charge à rupture  
218 (4.5kg). Les longueurs des filaments sont ensuite mesurées et relevées  
219 au fil du temps, à intervalle et temps réguliers (environ toutes les deux  
220 semaines, en fin de journée).



FIGURE 12 – Photo du test de fluage, filaments suspendus

222

On détermine la section du filament :

$$S = \frac{\Pi * r^2}{4} = \frac{\Pi * 1.75^2}{4} = 2.4 \text{ mm}^2 \quad (1)$$

223

Puis la contrainte appliquée :

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{15}{2.4} = 6.25 \text{ MPa} \quad (2)$$

224

Et enfin l'allongement du filament :

$$\epsilon = \frac{l(t) - l(0)}{l(0)} \quad (3)$$

Date	Jours	PLA (MakerBot)	Allongement PLA ( $\mu\text{m}$ )	Allongement / Contrainte PLA ( $\mu\text{m/mm/MPa}$ )	ABS (MakerBot)	Allongement ABS ( $\mu\text{m}$ )	Allongement / Contrainte ABS ( $\mu\text{m/mm/MPa}$ )	Carbon (ColorFabb)	Allongement Carbon ( $\mu\text{m}$ )	Allongement / Contrainte Carbon ( $\mu\text{m/mm/MPa}$ )	Wood (ColorFabb)	Allongement Wood ( $\mu\text{m}$ )	Allongement / Contrainte Wood ( $\mu\text{m/mm/MPa}$ )	Contrainte (MPa)
23/04/2015	0	2.139	0,000		2,007	0,000		2,219	0,000		2,227	0,000		0,00
23/04/2015	0	2.140	467,508	74,801	2,010	1494,768	239,163	2,220	450,653	72,105	2,230	1347,104	215,537	6,25
25/04/2015	2	2.140	467,508	74,801	2,010	1494,768	239,163	2,220	450,653	72,105	2,231	1796,158	287,382	6,25
08/05/2015	15	2.140	467,508	74,801	2,010	1494,768	239,163	2,220	450,653	72,105	2,232	2245,173	359,228	6,25
18/05/2015	25	2.140	467,508	74,801	2,010	1494,768	239,163	2,220	450,653	72,105	2,235	3562,277	574,764	6,25
24/05/2015	31	2.141	935,016	149,603	2,010	1494,768	239,163	2,220	450,653	72,105	2,240	5837,449	933,992	6,25
07/06/2015	42	2.141	935,016	149,603	2,010	1494,768	239,163	2,221	901,367	144,209	2,270	19398,407	3689,358	6,25
10/06/2015	53	2.142	1402,325	224,404	2,010	1494,768	239,163	2,221	1451,860	144,209	2,271	36401,417	36401,423	6,25
20/06/2015	63	2.142	1402,325	224,404	2,010	1494,768	239,163	2,222	1511,860	216,314	2,289	47940,444	44544,423	6,25
09/07/2015	73	2.142	1402,325	224,404	2,010	1494,768	239,163	2,225	1802,414	288,419	2,355	43101,319	69971,171	6,25
14/07/2015	83	2.144	2937,541	314,007	2,011	1993,024	318,884	2,234	2553,367	360,529	2,361	55890,267	8928,446	6,25
27/07/2015	95	2.146	3272,557	523,609	2,011	1993,024	318,884	2,235	2703,921	432,827	2,363	56578,357	9052,537	6,25
08/08/2015	107	2.146	3272,557	523,609	2,011	1993,024	318,884	2,235	2703,921	432,827	2,366	57925,450	9298,074	6,25
16/08/2015	115	2.146	3272,557	523,609	2,011	1993,024	318,884	2,238	3154,574	504,732	2,360	59721,599	9555,456	6,25
22/08/2015	121	2.147	3740,066	598,410	2,011	1993,024	318,884	2,238	3154,574	504,732	2,363	61088,702	9770,982	6,25
08/09/2015	138	2.148	4207,574	673,212	2,011	1993,024	318,884	2,237	3605,228	576,838	2,370	64219,444	10273,911	6,25
17/09/2015	145	2.148	4207,574	673,212	2,011	1993,024	318,884	2,237	3605,228	576,838	2,372	65110,013	10417,602	6,25
26/09/2015	154	2.148	4207,574	673,212	2,012	2491,281	368,605	2,237	3605,228	576,838	2,377	67355,188	10779,830	6,25
06/10/2015	164	2.149	4675,082	748,013	2,012	2491,281	368,605	2,237	3605,228	576,838	2,381	69151,325	11064,212	6,25
17/10/2015	175	2.149	4675,082	748,013	2,011	1993,024	318,884	2,237	3605,228	576,838	2,377	67355,188	10779,830	6,25
25/10/2015	183	2.149	4675,082	748,013	2,011	1993,024	318,884	2,237	3605,228	576,838	2,377	67355,188	10779,830	6,25
07/11/2015	196	2.149	4675,082	748,013	2,011	1993,024	318,884	2,237	3605,228	576,838	2,373	65559,048	10489,448	6,25
17/11/2015	206	2.148	4207,574	673,212	2,011	1993,024	318,884	2,237	3605,228	576,838	2,373	65559,048	10489,448	6,25
17/11/2015	206	2.142	1402,525	2,007	0,000			2,236	3154,574		2,366	62415,806	0,00	
26/11/2015	215	2.141	935,016	2,007	0,000			2,225	2703,921		2,363	61088,702	0,00	
05/12/2015	224	2.141	935,016	2,007	0,000			2,224	2253,267		2,362	60619,668	0,00	

FIGURE 13 – Relevés du test de fluage

Date	Jours	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbon (ColorFabb)	Wood (ColorFabb)	Notes
23/04/2015	0	467,51	1494,77	450,65	1347,10	Déformation Instantanée ( $\Delta T \mu\text{m}$ )
17/11/2015	206	3740,07	498,26	3154,57	64211,94	Déformation de Fluage ( $\Delta T \mu\text{m}$ )
17/11/2015	206	2805,05	1993,02	450,65	3143,24	Retour Elastique ( $\Delta T \mu\text{m}$ )
05/12/2015	224	-467,51	0,00	-901,31	-1796,14	Retour de Fluage ( $\Delta T \mu\text{m}$ )
05/12/2015	224	935,02	0,00	2253,27	60619,67	Déformation Permanente ( $\Delta T \mu\text{m}$ )

FIGURE 14 – Déformations instantanées et différences

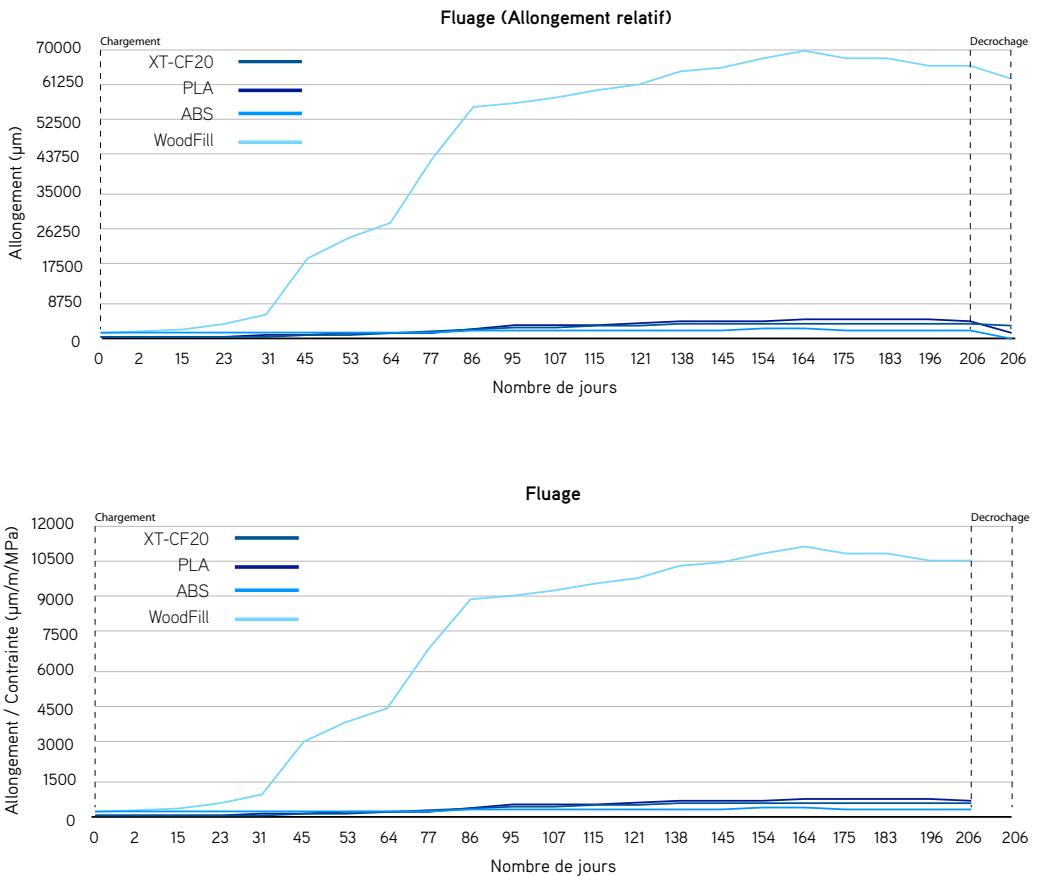


FIGURE 15 – Courbes de fluage

225 Les mesures de ce test montrent certaines évolutions.  
 226 Le PLA semble s'allonger de manière minime (1cm en 6 mois), tandis que  
 227 les fibres de Carbone ont l'air de jouer leur rôle également (similaire au  
 228 PLA), contrairement aux fibres de Bois qui se sont étirées de plusieurs cen-  
 229 timètres (13.5cm). Et plutôt surprenant, l'ABS a quant à lui eu un effet  
 230 parfaitement stable en s'allongeant de seulement 4mm.  
 231 On peut en déduire qu'à l'exception des fibres de bois, les autres filaments  
 232 ne fluent pas et ce caractère est donc négligeable.

### 233 Tests de durabilité -

234 Une autre série de tests a été menée pour évaluer la résistance de ces  
 235 matériaux à deux facteurs importants : les Ultraviolets et l'Humidité.

<sup>237</sup> Pour se faire, des éprouvettes identiques à celles utilisées pour les tests  
<sup>238</sup> de traction sont conditionnées dans des environnements propices à ces ex-  
<sup>239</sup> positions.

<sup>240</sup> Le premier critère, la lumière ultraviolette et l'exposition au soleil sont  
<sup>241</sup> simplement effectués en plaçant les éprouvettes à l'extérieur, tout en limi-  
<sup>242</sup> tant leur contact à l'eau (éprouvettes suspendues et abritées).

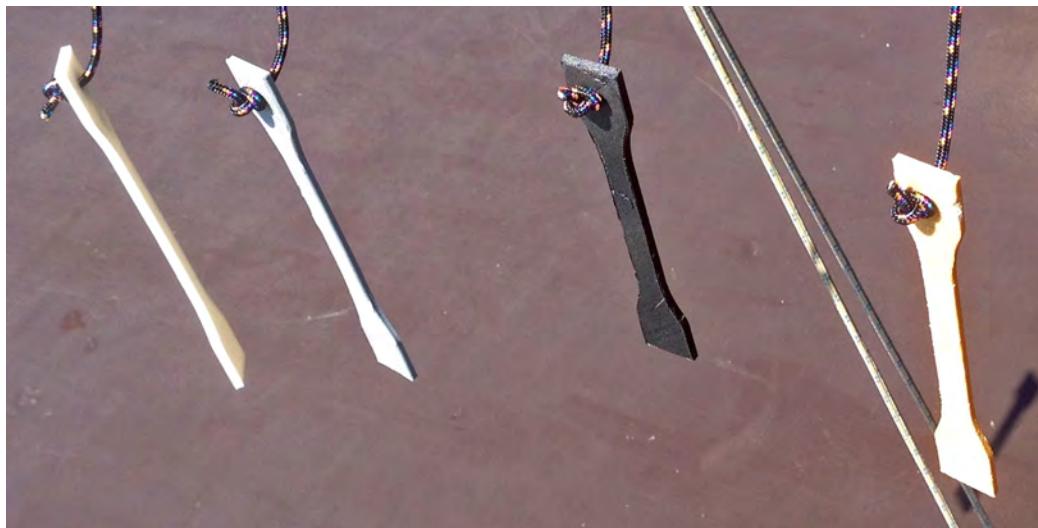


FIGURE 16 – Photo des éprouvettes exposées aux Ultraviolets

<sup>243</sup> Les mesures sont effectuées en pesant les éprouvettes régulièrement,  
<sup>244</sup> afin de vérifier une éventuelle prise ou perte de poids signifiant une altéra-  
<sup>245</sup> tion ou non, puis sont soumises au même test de traction que les premiers  
<sup>246</sup> essais.

	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbon (ColorFabb)	Wood (ColorFabb)
24/05/2015	5,98	5,35	6,95	5,60
07/06/2015	5,98	5,37	6,97	5,70
27/06/2015	5,98	5,33	6,97	5,69
09/07/2015	5,98	5,38	6,98	5,71
27/07/2015	5,99	5,39	6,98	5,72
08/08/2015	5,98	5,36	6,97	5,70
22/08/2015	5,98	5,35	6,97	5,69
08/09/2015	6,00	5,39	6,98	5,71
26/09/2015	6,01	5,43	6,99	5,72
08/10/2015	6,00	5,42	7,00	5,70
17/10/2015	6,00	5,42	7,00	5,72
25/10/2015	5,98	5,40	7,00	5,72
07/11/2015	5,97	5,40	7,00	5,73
17/11/2015	5,97	5,40	7,00	5,73

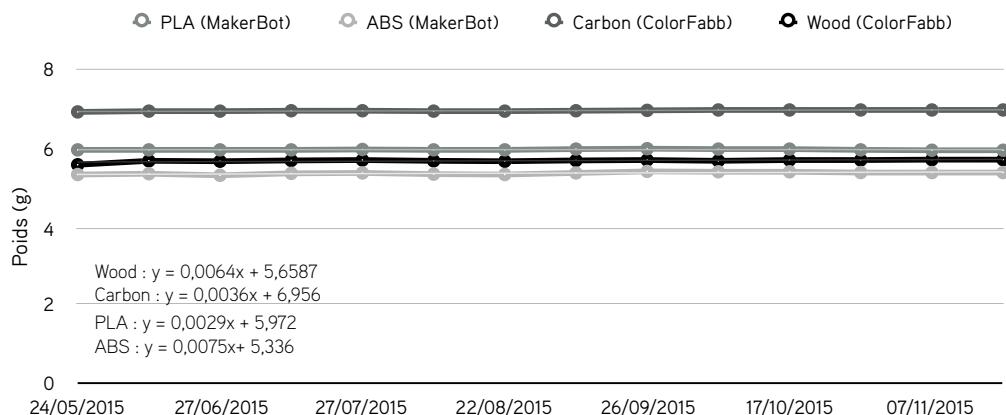


FIGURE 17 – Relevés du test d'exposition aux ultraviolets

Les valeurs relevées de ce test ne montrent pas de résultats significatifs, à l'exception d'une légère prise de poids probablement due à une exposition à l'humidité.

Soumettons-les maintenant à un test de traction, dans les mêmes conditions que ceux réalisés précédemment.

Traction UV	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	Wood (COLORFABB)
Charge (N)	680,710	639,807	835,178	429,314
Charge à limite élastique (N)	127,236	119,590	137,667	78,918
Contrainte maximale à rupture (MPa)	113,452	106,635	139,196	71,552
Contrainte de traction (MPa)	21,206	19,932	22,944	13,153
Déformation de traction (Déplacement %)	10,367	4,284	3,037	2,622
Déplacement de traction (mm)	7,257	2,999	2,126	1,836
Module d'Young (GPa)	1,326	0,883	1,554	0,969
Temps à rupture (s)	83,7	154,4	124,7	100,3
Densité (kg/m3)	1210	1060	1370	1240
Coefficient de Poisson	0,36	0,35	?	?
Absorption d'eau (%)	?	0,7	?	?
Coefficient de dilatation thermique (*10^-6 K^-1)	?	80	?	?

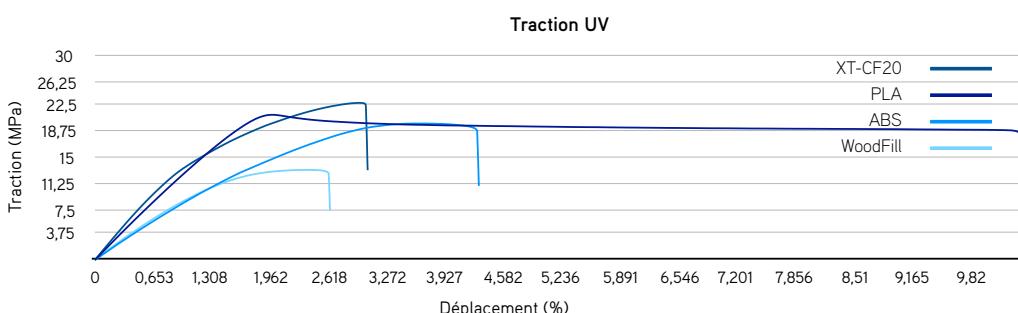


FIGURE 18 – Relevés du test de traction des éprouvettes exposées aux ultraviolets

On remarque que la contrainte à rupture a diminué de près de 42% pour le PLA et de 31% pour le Carbone, tandis que le Bois chute de 14% et l'ABS de 13%, par rapport au test de traction longitudinale (meilleures performances).

Le deuxième critère évalué est celui de l'Humidité. Pour cela, une série est placée en immersion totale des éprouvettes dans une solution d'eau H2O. De même que pour les ultraviolets, les éprouvettes sont pesées pour voir d'éventuelles altérations.

	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbon (ColorFabb)	Wood (ColorFabb)
24/05/2015	6,33	5,55	6,15	5,71
07/06/2015	6,39	5,60	6,21	5,89
27/06/2015	6,38	5,58	6,20	5,99
09/07/2015	6,39	5,60	6,20	6,02
27/07/2015	6,41	5,59	6,22	6,09
08/08/2015	6,40	5,62	6,21	6,11
22/08/2015	6,43	5,64	6,22	6,15
08/09/2015	6,43	5,68	6,23	6,21
26/09/2015	6,45	5,67	6,24	6,29
08/10/2015	6,46	5,71	6,24	6,32
17/10/2015	6,46	5,71	6,24	6,38
25/10/2015	6,47	5,74	6,25	6,43
07/11/2015	6,47	5,74	6,28	6,67
17/11/2015	6,47	5,74	6,30	6,74

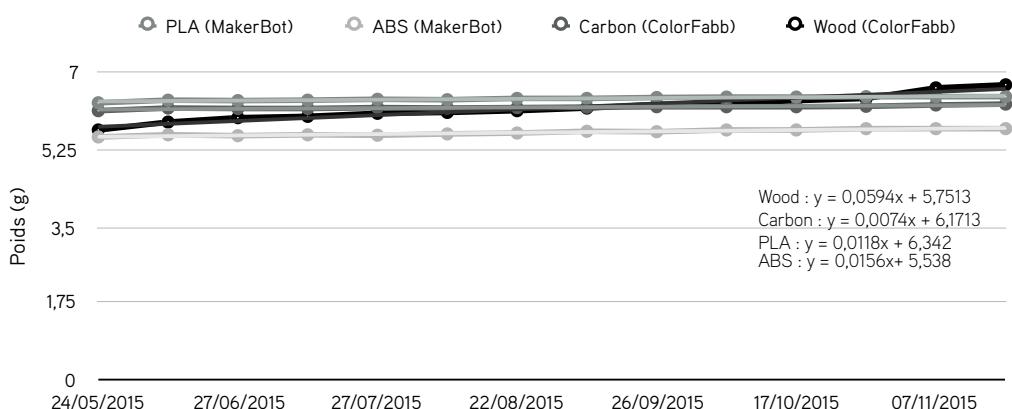


FIGURE 19 – Relevés du test d’immersion

261 Les éprouvettes immergées sont soumises à des tests de traction dans la  
262 continuité de ceux effectués auparavant.

Traction Immersion	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	Wood (COLORFABB)
Charge (N)	937,925	692,100	752,937	315,501
Charge à limite élastique (N)	183,427	123,589	133,185	57,433
Contrainte maximale à rupture (MPa)	156,321	115,350	125,489	52,583
Contrainte de traction (MPa)	<u>30,571</u>	<u>20,598</u>	<u>22,197</u>	<u>9,572</u>
Déformation de traction (Déplacement %)	<u>6,918</u>	<u>9,039</u>	<u>5,073</u>	<u>3,168</u>
Déplacement de traction (mm)	4,843	6,327	3,551	2,218
Module d'Young (GPa)	<u>1,420</u>	<u>0,835</u>	<u>1,310</u>	<u>0,838</u>
Temps à rupture (s)	144,6	205,7	184,2	103,2
Densité (kg/m3)	1210	1060	1370	1240
Coefficient de Poisson	0,36	0,35	?	?
Absorption d'eau (%)	?	0,7	?	?
Coefficient de dilatation thermique (*10^-6 K^-1)	?	80	?	?

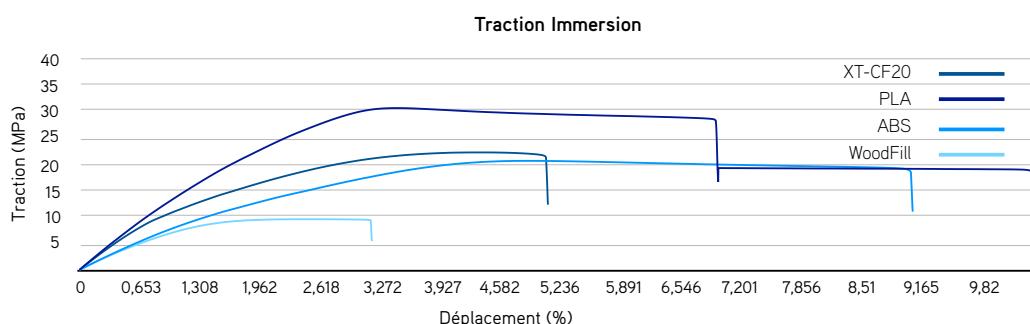


FIGURE 20 – Relevés du test de traction des éprouvettes immergées

263 On remarque que la contrainte à rupture à diminué de près de 16%  
264 pour le PLA, de 33% pour le Carbone ainsi que le Bois, et l'ABS de 8% par  
265 rapport au test de traction longitudinale.

266 Ces résultats montrent une grande sensibilité à l'eau, donc une grande  
267 porosité pour les fibres de Bois et de Carbone.

### 2.1.3 Matériaux retenus

Conclusion (Valeurs absolues)	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	Wood (COLORFABB)
90° - Contrainte (MPa)	<u>36,967</u>	<u>23,120</u>	<u>33,235</u>	<u>15,332</u>
45° - Contrainte (MPa)	<u>30,887</u>		<u>10,002</u>	
0° - Contrainte (MPa)	<u>24,584</u>	<u>23,120</u>	<u>23,320</u>	<u>23,120</u>
UV - Contrainte (MPa)	<u>21,206</u>	<u>19,932</u>	<u>22,944</u>	<u>13,153</u>
H <sub>2</sub> O - Contrainte (MPa)	<u>30,571</u>	<u>20,598</u>	<u>22,197</u>	<u>9,572</u>
90° - Déformation (%)	<u>2,254</u>	<u>3,781</u>	<u>2,676</u>	<u>1,870</u>
45° - Déformation (%)	<u>5,266</u>		<u>2,146</u>	
0° - Déformation (%)	<u>1,908</u>	<u>2,272</u>	<u>1,508</u>	<u>2,249</u>
UV - Déformation (%)	<u>10,367</u>	<u>4,284</u>	<u>3,037</u>	<u>2,622</u>
H <sub>2</sub> O - Déformation (%)	<u>6,918</u>	<u>9,039</u>	<u>5,073</u>	<u>3,168</u>
90° - Module d'Young (GPa)	<u>3,158</u>	<u>1,643</u>	<u>3,260</u>	<u>2,015</u>
45° - Module d'Young (GPa)	<u>0,915</u>		<u>0,858</u>	
0° - Module d'Young (GPa)	<u>2,563</u>	<u>1,656</u>	<u>2,182</u>	<u>1,969</u>
UV - Module d'Young (GPa)	<u>1,326</u>	<u>0,883</u>	<u>1,554</u>	<u>0,969</u>
H <sub>2</sub> O - Module d'Young (GPa)	<u>1,420</u>	<u>0,835</u>	<u>1,310</u>	<u>0,838</u>
Fluage - ΔT (mm)	<u>8,0</u>	<u>1,0</u>	<u>7,0</u>	<u>143,0</u>

FIGURE 21 – Comparaison des résultats aux tests

Après ces tests, on peut isoler et considérer que le PLA et les fibres de Carbone sont deux des quatre matériaux étudiés qui semblent les plus propices et les plus adaptés à l'utilisation en architecture, particulièrement dans le cas de pièces d'assemblages à échelle 1 :1.

Le filament de fibres de Carbone semble le plus propice en durabilité et résistance pour un cout raisonnable (60\$/kg), tandis que le filament PLA semble apte si l'on compte opérer un post-traitement sur la pièce ou l'utiliser en environnement sec.

Le filament de fibres de Bois aurait pu être intéressant à exploiter, mais ses résistances sont bien en dessous des deux autres, il reste peut être intéressant malgré tout dans le cas d'impressions bimatériaux, dans le but d'avoir juste une couche de finition extérieure en fibres de Bois, simplement pour

donner un aspect bois esthétique, et l'intérieur structurel de la pièce en PLA ou fibres de Carbone.

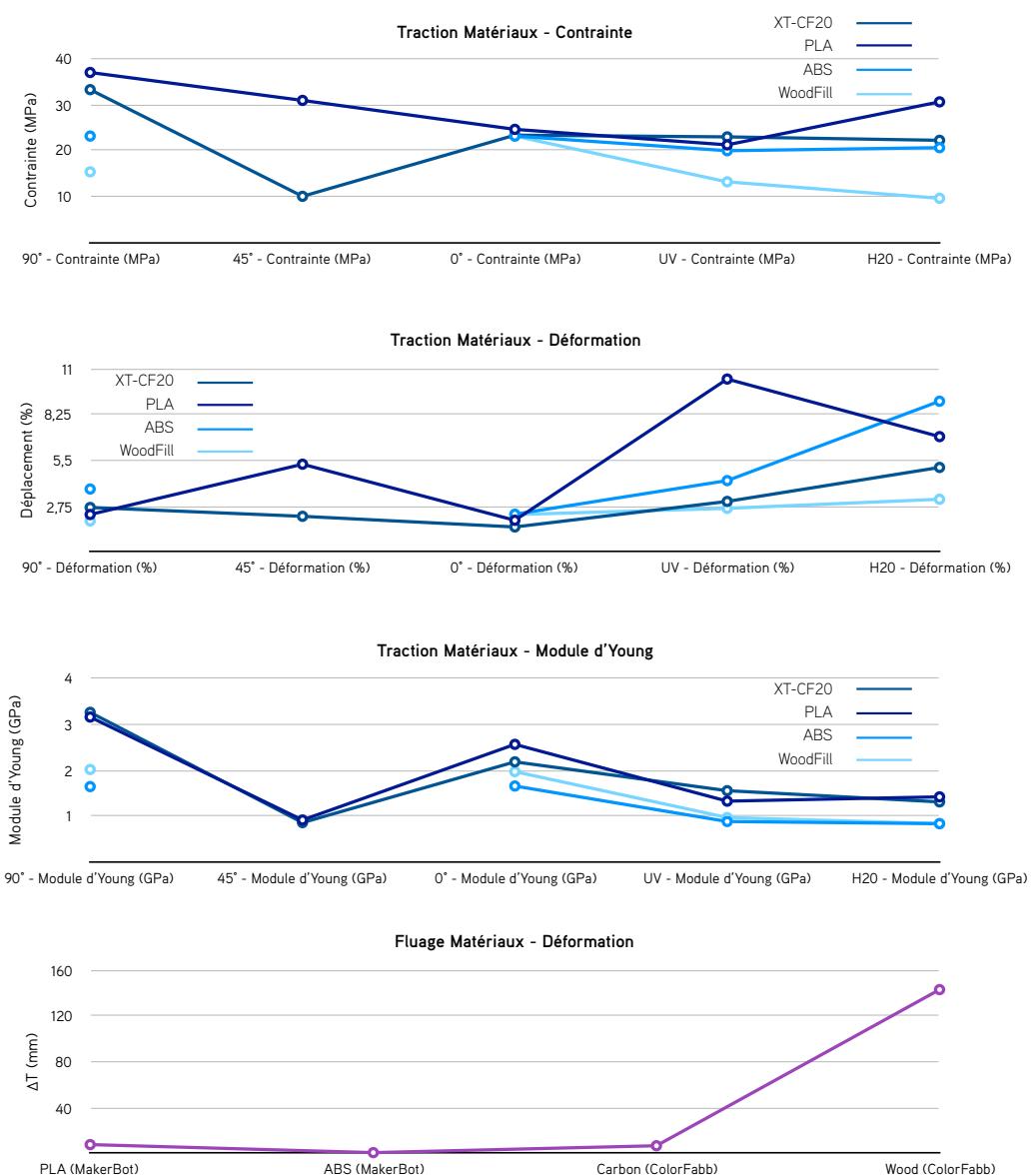


FIGURE 22 – Résumé des performances des matériaux testés

## 2.2 Expérimentations Logicielles

Le but de cette approche logicielle est de pouvoir isoler et tester différents parcours d'outil et optimisations topologiques sur un nœud ou un assemblage type. Il servira pour montrer les possibilités de contrôles dans le dépôt du filament et donc de pouvoir diriger l'orientation des fibres ou couches.

### 2.2.1 Parcours d'outil

Etant donné que le sujet a déjà été étudié par la Start-Up 3DMatter comme stipulé, je vais présenter rapidement les points sur lesquels l'utilisateur peut jouer pour modifier son parcours.

La plupart des logiciels de génération de parcours proposent différentes fonctions :

- les Températures : extrusion, plateau
- les Vitesses : déplacement, extrusion, parfois plus précis (remplissage, pourtour, supports...)
- la Densité : type de pavage, pourcentage plein/vide (souvent la même pour l'ensemble de la pièce)
- la Résolution : épaisseur des couches, nombre de pourtours, parfois plus précis (épaisseur intérieure et extérieure, épaisseur du toit et plancher de la pièce)
- les Radeaux et Supports : pour la bonne tenue de la pièce sur le plateau et porte à faux
- le Multi-matériaux : si plusieurs buses d'extrusion

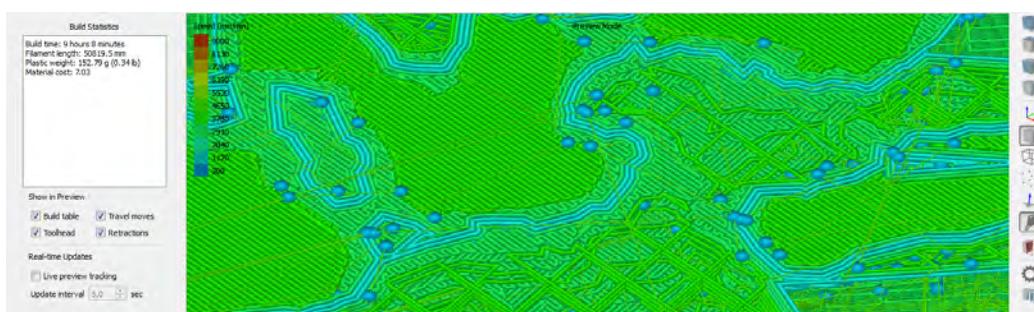


FIGURE 23 – Capture d'écran d'un détail d'une simulation de parcours d'outil (densités variables des remplissages et pourtours)

Ces paramètres peuvent influer grandement sur la résistance et la qualité de la pièce.

### **2.2.2 Optimisation et distribution de la matière**

Une autre recherche intéressante pour la fabrication d'une pièce structurelle est la répartition de la matière dans celle-ci. A-t-on nécessairement besoin d'une pièce pleine à 100% ou peut-on en dégager des zones non utiles au niveau des descentes de charges ?

Dans l'industrie, beaucoup de pièces passent par ce processus d'optimisation, optimisation topologique, car il permet de réduire à la fois la quantité de matière utilisée et donc le temps et coût de production.

Ce principe est donc parfaitement applicable dans notre cas d'une pièce d'assemblage réalisée en impression 3D.

Le nœud étudié est généré sur Grasshopper et Rhinocéros 3D, entièrement paramétrable et issu d'une relation dynamique d'éléments 2D, à la manière d'un GridShell.

L'application des charges et appuis, la simulation des déformations, et l'optimisation topologique sont réalisées sur SolidThinking Inspire, logiciel de la suite HyperWorks d'Altair<sup>12</sup>.

Enfin, l'impression et la gestion des densités sont effectuées avec le générateur de parcours d'outil de MakerBot<sup>13</sup> (qui justement ne sait pas gérer plusieurs densités au sein d'une même pièce), et Simplify3D<sup>14</sup> qui est actuellement le plus complet sur le marché et gère cette option.

#### **Génération du nœud -**

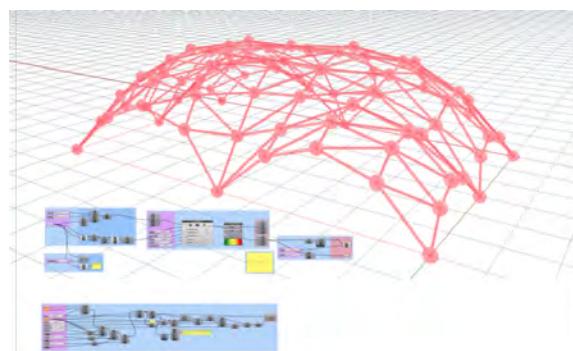


FIGURE 24 – Relaxation de la structure et génération des nœuds

12. <http://www.altairhyperworks.com/>

13. <https://www.makerbot.com/desktop>

14. <https://www.simplify3d.com/>

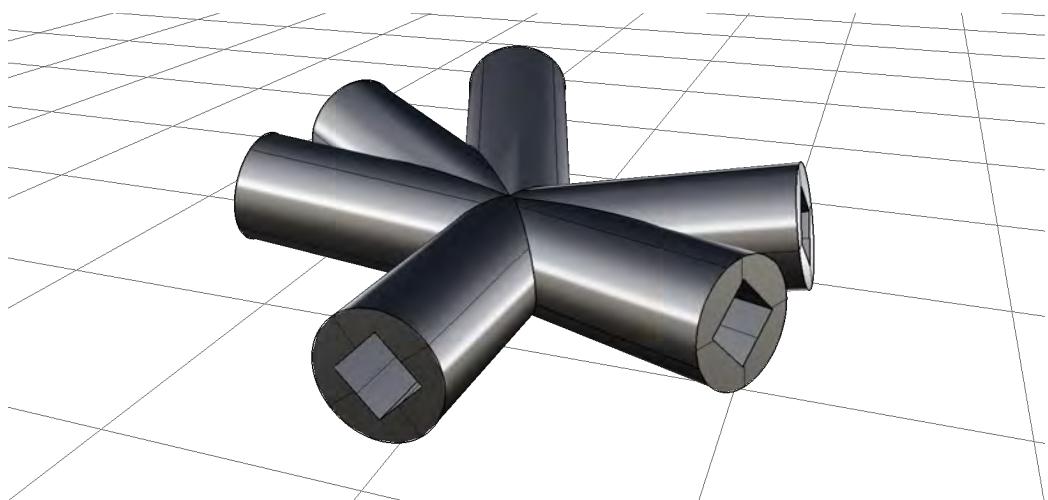


FIGURE 25 – Rendu 3D d'un nœud d'assemblage



FIGURE 26 – Photo du nœud d'assemblage imprimé

330

## Simulation des charges -

331

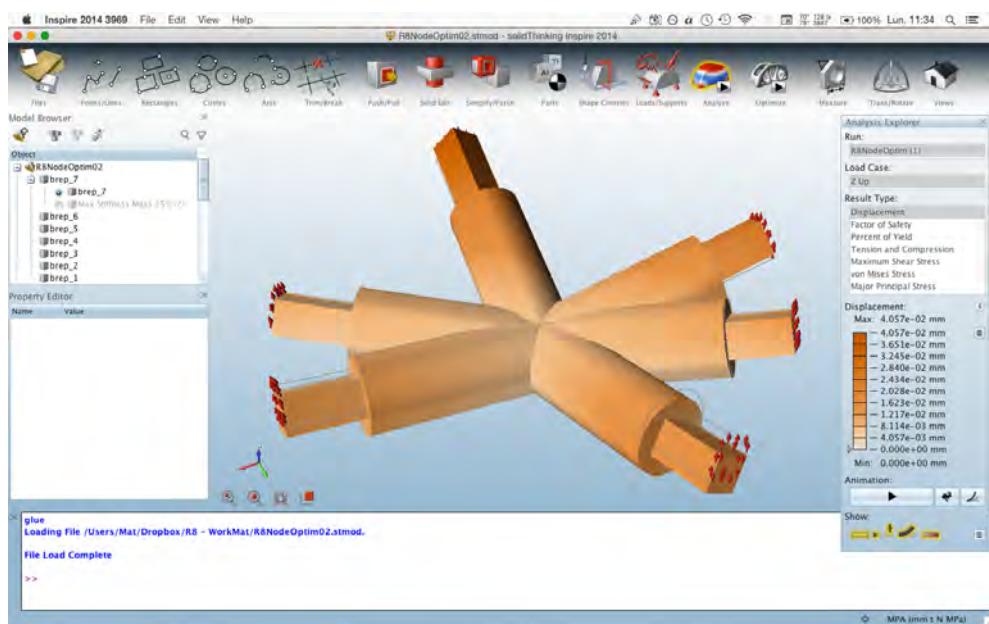
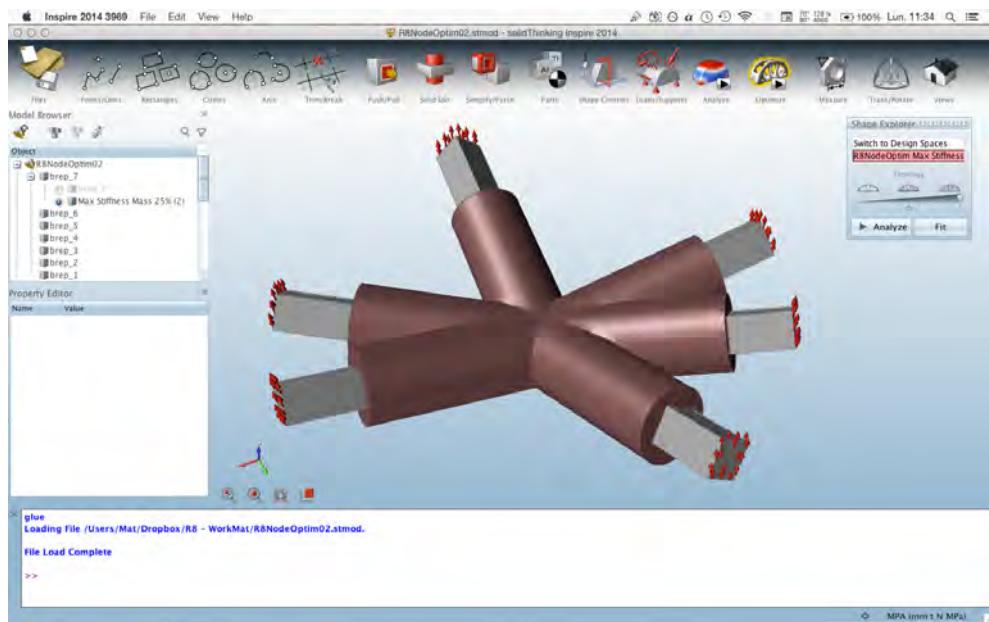


FIGURE 27 – Capture d'écran de l'application des charges (haut, charges verticales Z 100N) et simulation des déplacements suivant ces efforts (bas) dans SolidThinking Inspire

332

## Optimisation topologique

333

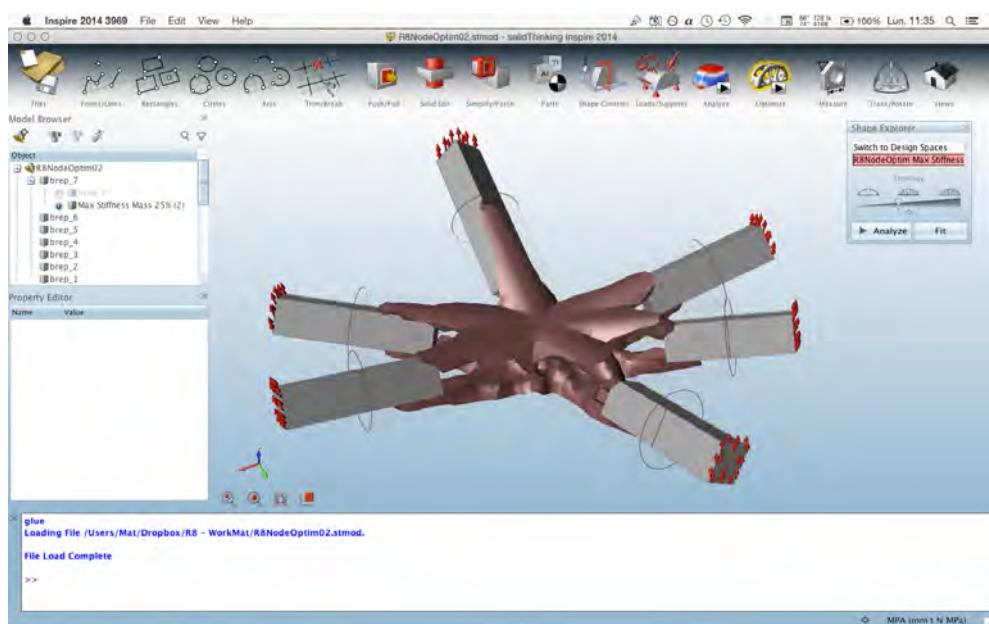
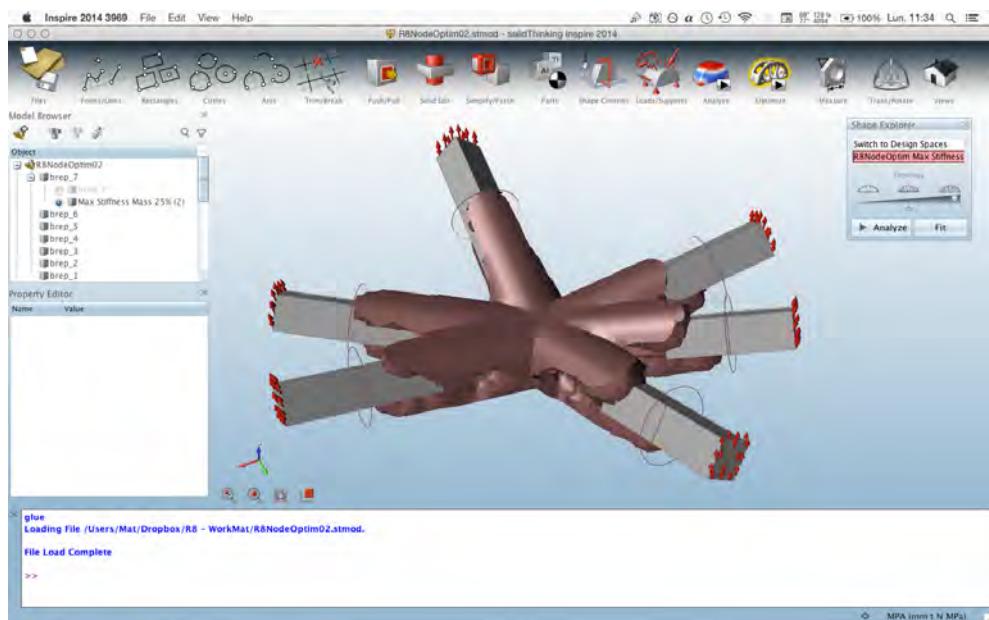


FIGURE 28 – Capture d'écran de l'optimisation topologique en fonction des efforts précédents toujours dans SolidThinking Inspire (haut, 50% de la masse totale) (bas, 20% de la masse totale)

334

## Gestion des densités

335

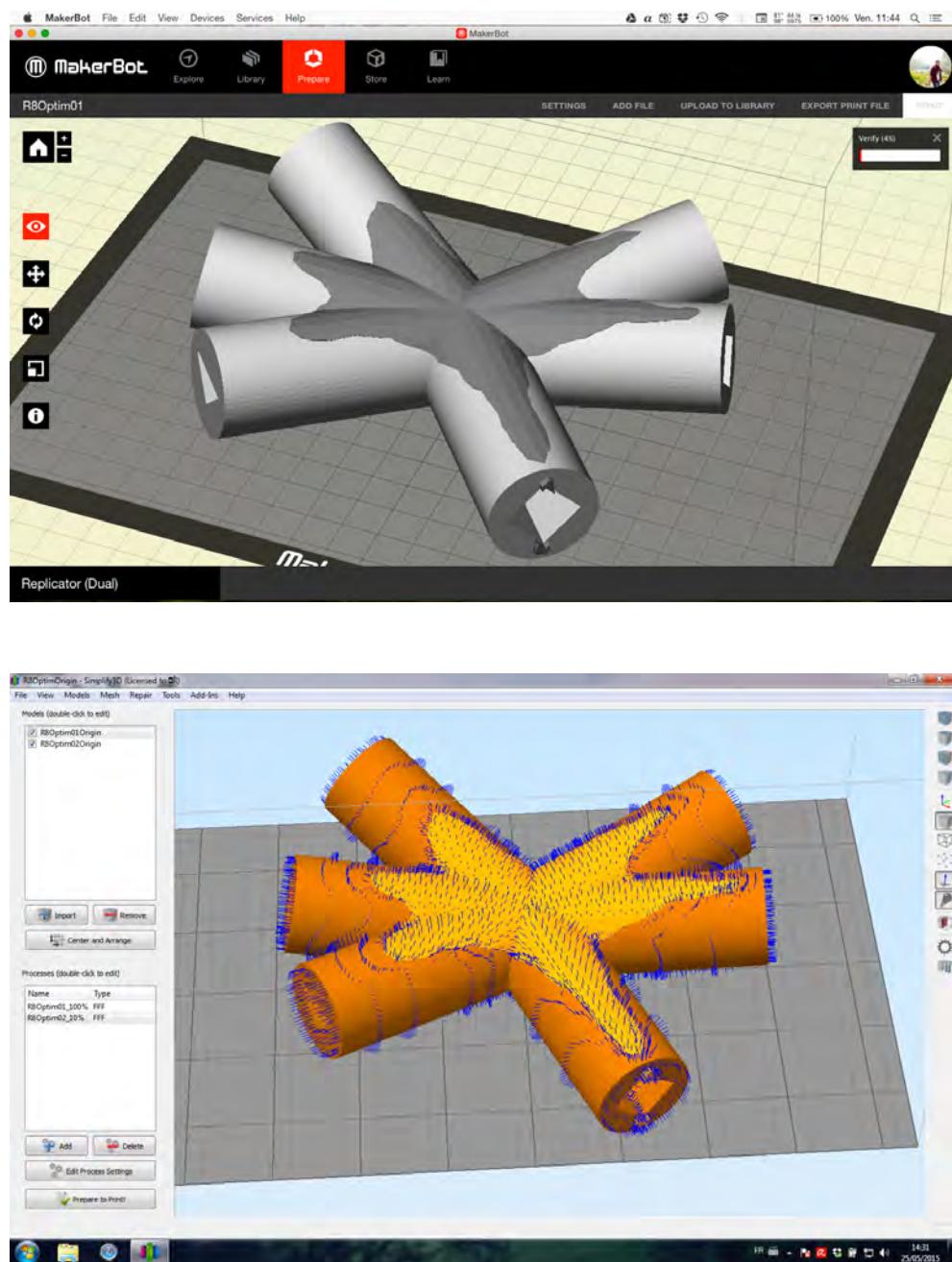


FIGURE 29 – Capture d'écran du nœud optimisé dans les générateurs de parcours d'outil MakerBot (haut) et Simplify3D (bas)

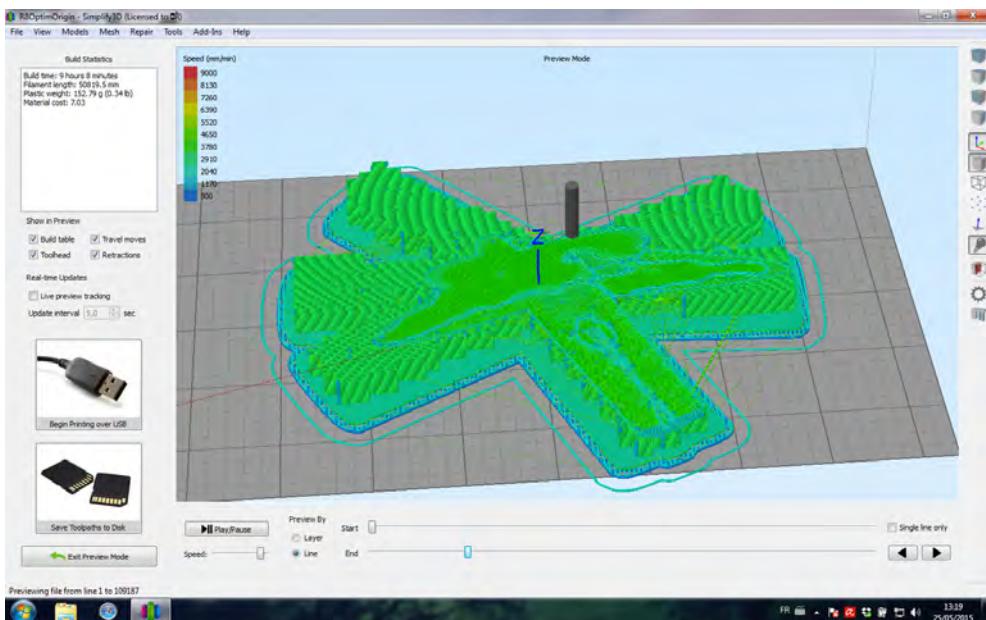
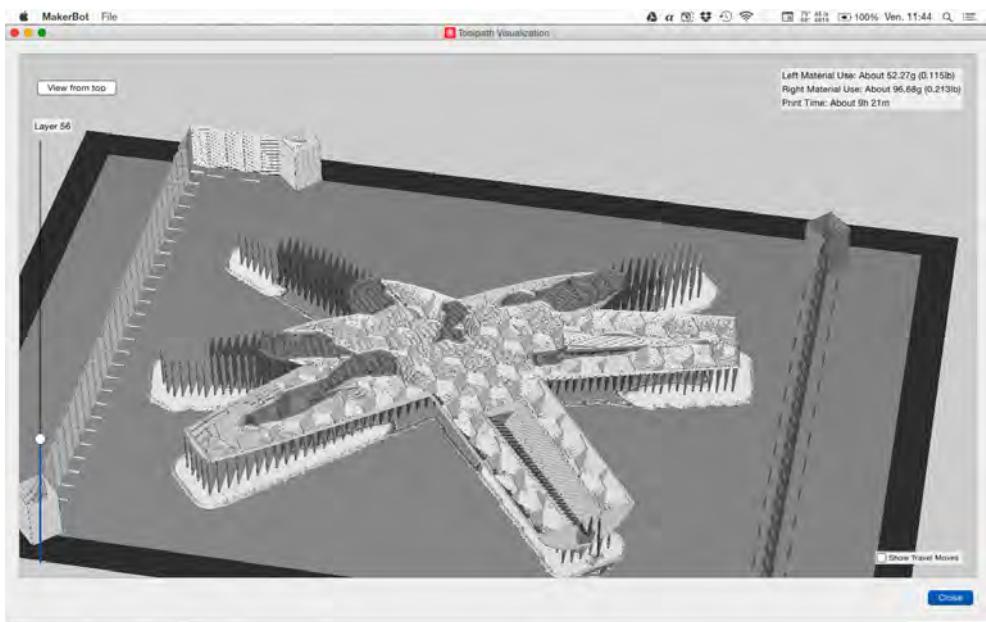


FIGURE 30 – Capture d'écran de la prévisualisation du parcours d'outil dans MakerBot (haut, pas de gestion des densités) et Simplify3D (bas, gestion des densités)

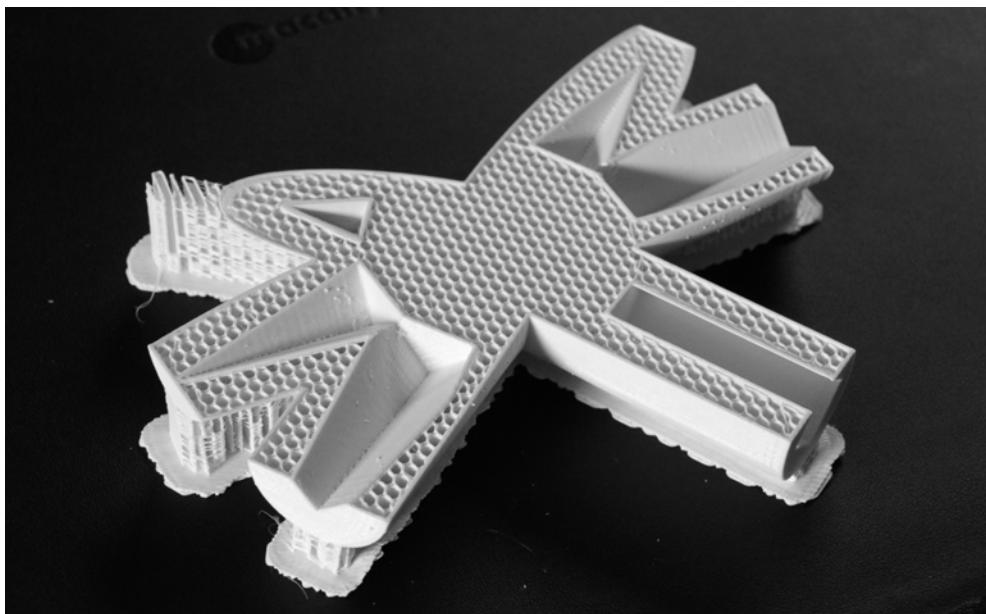


FIGURE 31 – Photos d'une section du nœud non optimisé (haut, MakerBot) et optimisé (bas, Simplify3D) en PLA

<sup>336</sup> Le cœur central est bien plein à 100% et le reste à 30%, comme réglé  
<sup>337</sup> dans le parcours d'outil en assignant chaque remplissage des volumes.

338       **2.2.3 Reverse engineering : Simulation des charges sur parcours d'ou-**  
339       **til**

340       Comme nous l'avons vu dans la partie d'optimisation topologique, les  
341       simulations d'efforts effectuées sont appliquées sur l'ensemble du volume  
342       de la pièce, en considérant que celle-ci a une répartition homogène de la  
343       matière, pleine.

344       Hors, on voit bien qu'en impression 3D il est, d'une part rare de fabriquer  
345       des pièces pleines, mais surtout la répartition de la matière n'est pas homogène,  
346       car le matériau utilisé n'est pas isotrope, et dépend de l'orientation  
347       (comme nous l'avons vu dans la première partie sur les essais de traction).

348       Un point intéressant serait donc de reprendre les données du parcours  
349       d'outil générer, d'en reconstruire un modèle 3D s'approchant au maximum  
350       de la géométrie qui serait obtenu par l'impression 3D<sup>15</sup>, et revenir simuler  
351       ces efforts sur ce nouveau modèle afin de pouvoir vérifier avant production  
352       la qualité de la pièce (quasi)-finale.

353       Cette étape est toujours en cours, malgré une difficulté technique impor-  
354       tante. En effet, la relecture des données est déjà en place, la possibilité  
355       de reprendre les points cibles du parcours et d'en régénérer un modèle 3D  
356       est également au point. Mais le problème est que ce modèle n'est pas di-  
357       rectement exploitable pour appliquer des calculs dessus, le fichier n'est pas  
358       sous forme volumique avec des liaisons propres entre les couches et tubes  
359       créés, rendant très lourds et même impossibles les opérations et calculs  
360       dessus. Point à développer...

---

15. <http://blog.makeprintable.com/g-code-reverser/>

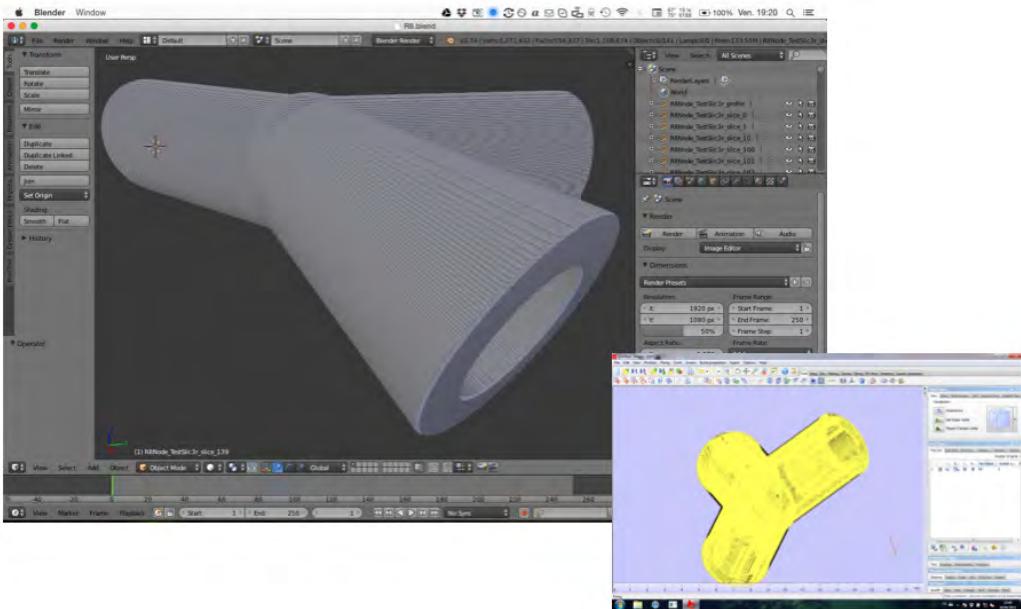


FIGURE 32 – Capture d'écran du logiciel 3D Blender (gauche), création d'un modèle 3D à partir d'un fichier Gcode. Et Magics (droite), montrant en jaune les arrêtes nécessitant des réparations géométriques

361 Le script Python créé pour convertir les fichiers Gcode en modèle 3D  
 362 géométrique marche quant à lui plutôt bien. En revanche, les réparations  
 363 des normales des facettes et autres opérations des logiciels spécialisés ne  
 364 fonctionnent pas et/ou prennent des heures de calculs.

### 3 Conclusion

Le but de cette recherche est donc d'obtenir un guide-conseil pour le choix de matériaux propices à la réalisation de pièces d'assemblage à échelle architecturale, en impression 3D.

Particulièrement pour le cas de pièces mécaniques vouées à travailler dans des conditions multiples (environnement ambiant, intérieur et/ou extérieur).

D'après ces tests et observations, il semble que le PLA soit le matériau le plus polyvalent à cette utilisation à condition de rester dans un environnement relativement contrôlé, en particulier au niveau de l'humidité ambiante.

Les fibres de Carbone semblent un bon choix pour venir relayer le PLA, dans des environnements moins favorables (à l'exception de l'humidité), où la température à un impact également (température de fusion plus haute, donc moins sensible au chaud), mais aussi pour une meilleure résistance à l'impact, moins d'élongation et fluage dans le temps.

L'ABS pourrait se montrer un bon élément, dans la mesure où celui-ci ne bouge que très peu entre les différentes configurations testées. Malheureusement, il se situe bien en dessous des performances des deux précédents. Il semble cependant un bon choix dans le cas de pièces sollicitées en cisaillement, compression, et charges permanentes.

Un hybride entre PLA et les fibres de Carbone pourrait conduire à des pièces encore plus performantes, en utilisation multi-matériaux.

Pour le moment, on peut affirmer que ces matériaux d'impression 3D se placent dans la catégorie des bois résineux courants, limitant encore leur utilisation en architecture échelle 1 :1.

On remarquera qu'entre le début de ces recherches menées depuis un peu plus d'un an, on a vu apparaître de nouveaux filaments commercialisés par différents constructeur, et aux propriétés nouvelles notamment en matière de durabilité et capacité de résistance mécanique (filament IGUS pour la résistance aux frottements, SmartABS qui corrige les défauts principaux de ce premier générique à savoir l'adhésion entre interfaces et la rétraction au refroidissement)<sup>16</sup>. Ces derniers étant donc théoriquement encore meilleurs que ceux étudiés dans cette recherche, en constante évolution.

16. <http://www.imprimante3dfrance.com/filaments.html>

## **4 Progression**

Une continuité à cette recherche pourrait être d'étendre les tests avec une série de post-traitements appliqués aux pièces imprimées, afin de voir l'impact et l'utilité d'une telle manipulation. Une refonte extérieure des couches par la chaleur, l'enduit d'une résine ou vernis structurels et protectrice, ou encore l'injection de colle<sup>17</sup>. Est-ce que les gains engendrés sont intéressants vis-à-vis du temps utilisé pour cette amélioration ?

Il pourrait aussi être intéressant de s'attaquer à la réalisation de pièces multi-matériaux<sup>18</sup>, comme énoncés dans l'article. L'exemple du PLA + Fibres de carbone, comme matériaux complémentaires vis-à-vis de leurs résultats obtenus dans ces tests. Est-ce que l'utilisation et la répartition de différents matériaux d'impression 3D modifient et améliorent les propriétés de la pièce ?

Enfin, l'ajout des nouveaux matériaux<sup>19</sup> qui se développent continuellement serait indispensable pour compléter ce guide et le tenir à jour.

---

17. J. T. BELTER, A. M. DOLLAR, Strengthening of 3D Printed Fused Deposition Manufactured Parts Using the Fill Compositing Technique, 2015, PLOS One

18. <http://3dprintingforbeginners.com/stop-3d-printing-everything-in-one-piece/>

19. <http://www.3dnatives.com/colorfabb-filaments-ngen-26112015/>

## 414 5 Remerciements

415 ENSA Paris Malaquais :

416 Robert LEROY

417 Loïc COUTON

418 Léda DIMITRIADI

419 Marc BENARD

420 Benoit VERAN

421 ENSAM Arts & Metiers ParisTech :

422 Justin DIRRENBERGER

423 Alain GAUDY

424 3D Matter :

425 Arthur SEBERT

426 Grégoire BERTACCO

427 Imprimante3DFrance :

428 Fournisseur matériaux

429 Université Paris XIII :

430 Romain AUFAURE

431 LeFabClub :

432 Caroline BAGNOST

433 Oceane DELAIN

434 Tatiana REINHARD

435 Clemence PUJO

436 Samuel BERNIER

437 DOOD Studio :

438 Julien Deprez

439 Altair :

440 Formation SolidThinking Inspire



## 441 6 Bibliographie

### 442 6.1 Assemblages mécaniques

443 - A. SANCHEZ SAMANO, 2014, *Assemblages de bois appliqués à la robo-*  
444 *tique architecturale*, mémoire AMC2

445 - FVB-FFC, 2013, *Les assemblages bois*, éditions fvb-ffc Constructiv

446 - J. OLSSON, 2012, *Form finding and size optimization, Implementation*  
447 *of beam elements and size optimization in real time form finding using dyna-*  
448 *mic relaxation*, mémoire Chalmers University of Technology

449 - T. NOLL, H. LHUISSIER, 2004, *Assemblages en bois*, éditions Eyrolles

450 - W. GRAUBNER, 2003, *Assemblages du bois : l'Europe et le Japon face a*  
451 *face*, éditions Vial

452 - <http://matsysdesign.com/tag/form-finding/>

453 Articles sur les Shell form finding (GridShell, HexShell...)

454 - <http://www.3ders.org/articles/20150804-print-to-build-olle-gellert-creates-unique-3d-printed-joints-for-furniture-design.html>

455 Article sur des pièces de jonctions pour mobilier, 2015

456 - <http://3dprint.com/71597/3d-printed-furniture-joints/>

457 Article sur l'impression de nœuds d'assemblage pour mobilier, 2015

458 - <http://www.nudel.it>

459 Système de construction par nœuds d'assemblage 3D, logiciel de génération  
460 des nœuds, 2015

461 - <http://www.christiansjostrom.com/LINK>

462 Structures modulaires d'un designer avec pièces de jonctions articulées im-  
463 primées en 3D, 2015

464 - <http://patharc.com/portfolio/asterism-series>

465 Pièces de jonction en impression 3D adaptables à n'importe quelle géomé-  
466 trie, 2015

467 - <http://flexiblestream.org/project/50-digital-wood-joints>

468 Fichiers de découpe d'assemblages bois pour usinage numérique, 2014

469 - <http://www.txnmydesign.com/grid-shell.html>

470 Réalisation de gridshells à partir de nœuds de jonction imprimés en 3D,  
471 2014

472 - <http://weburbanist.com/2014/04/22/3d-printable-connectors-make-diy-furniture-assembly-easy/>

473 Design de pièces de jonction paramétriques pour mobilier, 2014

- 476            - <http://69.195.124.128/ruptcouk/2013/09/17/control/>  
 477            Design de pièces de jonction pour mobilier, 2013  
 478            - <http://www.wikihouse.cc>  
 479            Plateforme collaborative pour préfabrication d'éléments d'assemblages de  
 480            maison, 2013  
 481            - <http://makezine.com/2012/04/13/cnc-panel-joinery-notebook/>  
 482            Séries de découpes d'assemblages bois pour usinage numérique ou découpe  
 483            laser, 2012  
 484            - <http://gt2p.com/filter/Digital-Crafting/Suple-Series>  
 485            Design de pièces de jonction entre différentes branches, 2011

## 486            6.2 Impression 3D

- 487            - M. GRIFFIN, 2015, *Design and Modeling for 3D Printing*, éditions Maker  
 488            Media  
 489            - J. T. BELTER, A. M. DOLLAR, *Strengthening of 3D Printed Fused Depo-*  
 490            *sition Manufactured Parts Using the Fill Compositing Technique*, 2015, PLOS  
 491            One  
 492            - B. CHAPMAN, S. DESAI, M. MURAOKA, T. VIDOLOVA, 2014, *Investi-*  
 493            *gating Methods of Prototyping with ABS*, étude d'un étudiant au Franklin W.  
 494            Olin College of Engineering (Boston)  
 495            - B. LUYT, S. N. Bernier, T. Reinhard, 2014, *Impression 3D Pas à Pas*,  
 496            éditions Marabout, collection "Loisirs Illustrés"  
 497            - B. M. Tymrak, M. KREIGER, and J. M PEARCE, 2014, *Mechanical Pro-*  
 498            *perties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers Under Rea-*  
 499            *listic Environmental Conditions*, revue Materials & Design  
 500            - M. B. STOKES, 2013, *3D Printing for Architects with MakerBot*, éditions  
 501            Packt Publishing  
 502            - N. Umetani, R. Schmidt, 2013, *Cross-sectional Structural Analysis for*  
 503            *3D Printing Optimization*, revue Autodesk Research  
 504            - H. Lipson, M. Kurman, 2013, *Fabricated the new world of 3D printing,*  
 505            *the promise and the peril of machine that can make (almost) anything*, édi-  
 506            tions John Wiley & Sons  
 507            - B. PETTIS, A. KAZIUNAS, J. SHERGILL, 2013, *Imprimer en 3D avec la*  
 508            *Makerbot*, éditions Eyrolles, collection "Serial makers"  
 509            - M. BERCHON, B. LUYT, 2013, *L'Impression 3D*, éditions Eyrolles, col-  
 510            lection "Serial makers"

- 511 - A. KAZIUNAS, 2013, *Make : 3D Printing : The Essential Guide to 3D*  
512 *Printers*, éditions Maker Media
- 513 - C. ANDERSON, 2012, *Makers : La nouvelle révolution industrielle*, édi-  
514 tions Pearson, collection “Les temps changent”
- 515 - B. EVANS, 2012, *Practical 3D Printers : The Science and Art of 3D Prin-*  
516 *ting*, éditions APress, collection “Technology in Action”
- 517 - <http://www.3dnatives.com/colorfabb-filaments-ngen-26112015/>  
518 Nouveau filament entre PLA et ABS développé par ColorFabb, 2015
- 519 - <http://www.imprimante3dfrance.com/filaments.html>  
520 Fournisseur consommables (ABS, Nylon, PETT, Flexibles...), Asnières-sur-  
521 Seine
- 522 - <http://www.filimprimante3d.fr/50-recherche-par-criteres>  
523 Fournisseur consommables avec possibilité de filtrage par critères (rigidité,  
524 durabilité...)
- 525 - <http://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic->  
526 [polymer-fibers/synthetic-fibers/material-properties-of-polyamide-](http://www.matbase.com/polymer-fibers/synthetic-fibers/material-properties-of-polyamide-)  
527 [fiber-nylon-fiber-pa-fiber.html](http://www.matbase.com/fiber-nylon-fiber-pa-fiber.html)  
528 Site web répertoriant les caractéristiques de certains polymères (PLA, Ny-  
529 lon, PETT...)
- 530 - <http://blog.makeprintable.com/g-code-reverser/>  
531 Recréation de géométrie 3D à partir d'un fichier de parcours d'outil
- 532 - <http://3dprintingforbeginners.com/infill-strength/>  
533 Article sur l'influence des paramètres de parcours d'outil sur la résistance  
534 des pièces, 2015
- 535 - <http://3dprintingforbeginners.com/stop-3d-printing-everything-in-one->  
536 [piece/](http://3dprintingforbeginners.com/piece/)  
537 Article sur l'anisotropie en impression 3D, 2015
- 538 - <http://www.instructables.com/id/3D-Printed-Molds-Casting-Tutorial->  
539 [Complex-Shapes/?ALLSTEPS](http://www.instructables.com/id/Complex-Shapes/?ALLSTEPS)  
540 Méthode de moulage à partir d'impression 3D (Silicone), 2015
- 541 - <http://www.instructables.com/id/TestrBot-The-300-Universal-Test-Machine/?ALLSTEPS>  
542 Fabrication d'une machine d'essai Open Source, 2015
- 543 - [http://www.3ders.org/articles/20150316-flexible-modular-3d-prints-](http://www.3ders.org/articles/20150316-flexible-modular-3d-prints-bend-and-stretch-without-losing-their-shape.html)  
544 [bend-and-stretch-without-losing-their-shape.html](http://www.3ders.org/articles/20150316-flexible-modular-3d-prints-bend-and-stretch-without-losing-their-shape.html)  
545 Article sur l'impression d'objets modulables avec armature métallique, 2015
- 546 - [http://www.3ders.org/articles/20150314-create-aged-metal-objects-](http://www.3ders.org/articles/20150314-create-aged-metal-objects-by-cold-casting-your-3d-prints.html)  
547 [by-cold-casting-your-3d-prints.html](http://www.3ders.org/articles/20150314-create-aged-metal-objects-by-cold-casting-your-3d-prints.html)  
548 Article sur le moulage métal à froid à partir de pièces imprimées, 2015

- 549 - <http://www.3ders.org/articles/20150207-new-infographic-details-how-to-pick-the-right-3d-printing-filament-for-your-next-project.html>  
550 Article sur le choix des technologies d'impression 3D en vue de certains  
551 domaines d'utilisation, 2015
- 553 - <http://www.3ders.org/articles/20141010-a-few-ways-to-strengthen-3d-printed-parts.html>  
554 Article sur la résistance de pièces imprimées 3D (Géométrie, Réglage, Post-  
555 traitement, Moulage), 2014
- 557 - <http://3dtopo.com/lostPLA/>  
558 Moulage métal à partir de pièces perdues imprimées en 3D en PLA, 2014
- 559 - <http://www.3ders.org/articles/20140228-open-source-3d-printed-parts-often-stronger-than-proprietary-versions.html>  
560 Article sur la résistance des pièces imprimées en 3D, 2014
- 562 - <http://3dprint.com/14533/3d-print-material-test/>  
563 Article sur des tests de résistance de certains matériaux d'impression 3D  
564 (ABS, Nylon, PLA...), 2014
- 565 - <http://makezine.com/projects/make-34/skill-builder-finishing-and-post-processing-your-3d-printed-objects/>  
566 Article sur les post-traitements, réparation de pièces imprimées en PLA /  
567 ABS, 2014
- 569 - <http://makezine.com/2014/04/24/stress-testing-injected-hot-glue-for-solid-fast-cheap-3d-prints/>  
570 Article sur des tests de résistance avec injection de colle dans les pièces  
571 imprimées en 3D, 2014
- 573 - <http://vr.sdu.edu.cn/lulin/3DP/build-to-last.html>  
574 Etude sur la résistance et l'optimisation de forme d'une pièce imprimée en  
575 3D, 2014
- 576 - <http://www.topolabs.com>  
577 Logiciel (abandonné) sur l'extrusion FDM continue et non par couche, 2014
- 578 - <http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-materials-bendlay-laywood-laybrick/>  
579 Article récapitulant les différents plastiques pour imprimante 3D, 2014
- 581 - <http://www.3ders.org/articles/20131222-printing-porous-and-fibrous-3d-objects-with-new-filament-line-poro-lay.html>  
582 - <http://www.3ders.org/articles/20141006-3d-printing-a-sponge-using-layfomm-filament-flexible-viscoelastic-properties.html>  
583 Articles sur un nouveau filament flexible et poreux (Poro-Lay), 2013 - 2014
- 586 - <http://airwolf3d.com/2013/11/30/7-steps-to-a-stronger-abs-part-with-resin/>

588 Post traitement de pièces imprimées en 3D par application de résine epoxy,  
589 2013  
590 - <http://www.theverge.com/2013/12/16/5215910/nervous-system-kinematics-3D-printing-app>  
591 Article sur une application pour créer des formes souples articulées en im-  
592 pression 3D, 2013  
593 - <http://www.3dppvd.org/wp/2013/02/soluble-support-material/>  
594 - <http://www.adafruit.com/blog/2013/10/03/makerbot-popularizes-hips-support-material-with-release-of-makerbot-dissolvable-filament-3dthursday-3dprinting/>  
595 Articles sur un type de supports solubles en impression 3D, 2013  
596 - <http://www.3ders.org/articles/20121031-high-strength-nylon-3d-printing-material-available-for-sale.html>  
597 Article sur le Nylon en impression 3D, 2012  
598 - <http://hpcg.purdue.edu/?page=publication&id=164>  
599 Etude sur la résistance et l'optimisation de forme d'une pièce imprimée en  
600 3D, 2012  
601 - <http://www.tridimake.com/2012/12/3d-printing-plastic-filaments-kinds-and.html>  
602 Article récapitulant les différents plastiques pour imprimante 3D, 2012  
603 - <http://makezine.com/projects/make-42/fun-with-flexibles/>  
604 Article sur la flexibilité de certains filaments pour impression 3D  
605 - <https://learn.adafruit.com/3d-printing-with-ninjaflex?view=all>  
606 Article sur l'impression 3D avec des filaments flexibles  
607  
608  
609  
610  
611

# Table des matières

612	<b>1</b>
613	<b>1</b>
614	<b>2 Expérimentation</b>
615	2.1 Expérimentations Physiques . . . . .
616	2.1.1 Choix des matériaux . . . . .
617	2.1.2 Tests des matériaux . . . . .
618	Tests de traction suivant l'orientation des fibres . . . . .
619	Test de fluage . . . . .
620	Tests de durabilité . . . . .
621	2.1.3 Matériaux retenus . . . . .
622	2.2 Expérimentations Logicielles . . . . .
623	2.2.1 Parcours d'outil . . . . .
624	2.2.2 Optimisation et distribution de la matière . . . . .
625	Génération du nœud . . . . .
626	Simulation des charges . . . . .
627	Optimisation topologique . . . . .
628	Gestion des densités . . . . .
629	2.2.3 Reverse engineering : Simulation des charges sur par-
630	cours d'outil . . . . .
631	<b>3 Conclusion</b>
632	<b>4 Progression</b>
633	<b>5 Remerciements</b>
634	<b>6 Bibliographie</b>
635	6.1 Assemblages mécaniques . . . . .
636	6.2 Impression 3D . . . . .