

Guide de matériaux et réglages d'impression 3D pour pièces d'assemblage à échelle architecturale

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 de fabrication numérique, la norme et le standard n'ont désormais plus 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 est un exemple, 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), pour pouvoir être réalisés par ces outils numériques (fraisage CNC 3 axes et/ou robotique industrielle). Quelques autres travaux ont également porté sur l'assemblage de tasseaux de bois par des nœuds imprimés en 3D, dans le cas de la réalisation d'une structure, type Gridshell par exemple.

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

- avoir des matériaux et fonctions multiples

Différentes solidités (rigide, flexible) et différents aspects (textures, couleurs).

- avoir des géométries et formes complexes

Pas de contraintes de fabrication. Possibilité de faire du non-standard et du sur mesure.

- avoir des gains de temps

Pas besoin d'usiner chaque poutre indépendamment. Utilisation de pièces industrielles standards (poutres ou tasseaux normalisés par exemple). Fabrication automatisée, multiple et simultanée, pas d'arrêt dans la chaîne de production (continuité de la conception à la fabrication, notion de "File to Factory").

- Avoir des couts moindres.

Uniquement du temps machine (majoritairement), sous-traitance et délocalisation possible, pas de perte de matière (principe même de la fabrication additive, dans notre cas "Fused Deposition Modeling").

- Permettre le recyclage.

Possibilité de réextruder de la matière première (filament) à partir de pièces déjà réalisées.

- Avoir des risques humains faibles.

Moins de personnel, pas de manipulations lourdes et/ou d'outils dangereux.

La technologie étudiée ici est donc l'impression 3D par extrusion dite FDM/FFF pour "Fused Déposition Modeling/Fused Filament Fabrication" soit "Dépot de matière fondu/Fabrication par filament fondu". Le choix de se concentrer sur cette technologie et non une autre, comme la Stéréolithographie ou le Frittage laser, vient du fait que c'est actuellement la plus démocratisée dans le domaine, mais aussi et surtout la plus rapide, la moins couteuse, et la plus résistante en comparaison des autres technologies (à l'exception du Frittage laser métal pour ce dernier point).

L'impression 3D FDM se place avec un prix d'environ 1\$/cm³, contre 3\$/cm³ pour le frittage laser polymère, 6\$/cm³ pour la stéréolithographie, et 64\$/cm³ pour le frittage laser métal. Elle permet également l'usage de multimatériaux simultanément, et ne requiert pas de post-traitement pour solidifier la pièce, les seuls points faibles étant une qualité de surface légèrement moins lisse et l'usage de supports pour des pièces en porte à faux.

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	
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			
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	
<hr/>																		
Semi-transparency														X	X			
Flexible	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	±	-	-	-	-	-
Maximal Build dimensions (mm³)	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 500 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	254x 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	0,3 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 µ	60 to 150 µ	150 µ	150 µ	150 µ	150 µ	120 to 330 µ	120 to 330 µ	120 to 330 µ	120 to 330 µ	14 to 28 µ	28 µ	50 to 150 µ	25 µ	25 µ	30 µ	30 µ	100 µ

Fig.1 : Comparatif des technologies d'impression 3D (source : Sculpteo)

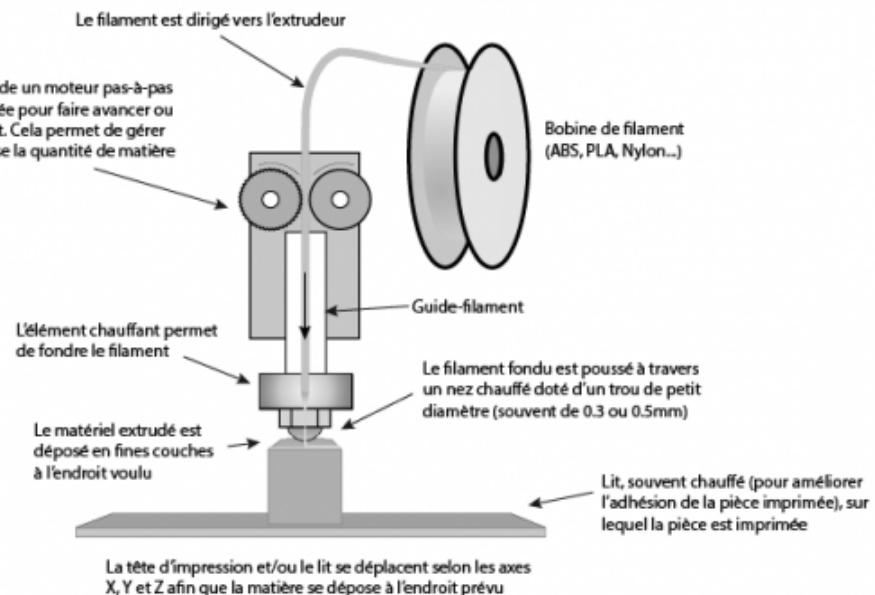


Fig.2 : Fonctionnement d'une imprimante 3D FDM/FFF

Le principe de fonctionnement d'une imprimante 3D FDM est donc simple, une buse chauffante extrude un matériau thermoplastique sous forme de filament (souvent entre 170 et 260°C), et se dépose ensuite en couches (épaisseur entre 0,1 et 0,3mm) sur un support afin de composer la pièce finale.

Mais une question importante se pose maintenant :

Quelle peut être la résistance de ces nœuds imprimés en 3D et leurs potentiels d'utilisation ? En matière d'impression 3D, les informations de résistances mécaniques et durées de vie des matériaux documentées sont toujours les caractéristiques propres du polymère utilisé. Aucun cas d'étude n'a réellement été porté sur une pièce complète réalisée, en pleine utilisation et sous charges.

Expérimentation

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

Ces tests se feront en deux temps, une première partie sur l'expérimentation physique avec les matériaux mêmes, puis une seconde sur les aspects logiciels et de parcours d'outil, méthodes de dépose de la matière. Le tout terminé avec un essai échelle 1:1 sur une pièce d'exemple.

N.B : En aucun cas la géométrie initiale (extérieure) de la pièce ne sera modifiée, seule la structure interne sera amenée à changer (induit par les réglages du logiciel de création de parcours d'outil, tels que le remplissage ou l'épaisseur des parois et/ou l'optimisation topologique).

Les paramètres propres aux réglages d'impression (influence de la résolution des couches, épaisseur, densité du remplissage et type de remplissage) ne seront pas testés, car déjà faits objet d'une étude par la startup partenaire (my3dmatter.com).

Expérimentations Physiques

Choix des matériaux

La première étape consiste en l'analyse et le choix des matériaux d'impression 3D FDM à tester.

Les matériaux privilégiés sont donc :

- le PLA générique (Acide Polylactique) - Fusion 150°C // Transition vitreuse 60°C

Matériau le plus répandu en impression 3D FDM, le moins couteux (30€/kg), facile à mettre en œuvre (pas de plateau chauffant requis), bonne adhésion entre couches, bonne précision dimensionnelle, et bonne finition. L'inconvénient majeur est qu'il est biodégradable.

- l' ABS générique (Acrylonitrile Butadiène Styrene) - Fusion 210°C // Transition vitreuse 105°C

Matériau très répandu également (antérieur au PLA), peu couteux (30€/kg), mais maintenant mis de plus en plus de côté par rapport au PLA. Nécessité d'un plateau chauffant pour atténuer la déformation pendant le refroidissement, adhésion entre couches moins bonnes, précision dimensionnelle moins bonne à cause des rétractions lors du refroidissement, finition moins bonne due à une adhésion entre couches moindre. Son avantage reste malgré tout sa résistance aux chocs.

- la fibre de Carbone (ColorFabb XT-CF20) - Fusion 220°C // Transition vitreuse 75°C

Nouveau matériau commercialisé depuis 2015 pour l'impression 3D FDM par ColorFabb. Il est deux fois plus couteux que le PLA ou l'ABS (60€/kg), mais est stipulé être plus dense que les deux autres (1,35g/cm³), composé de 20% de fibres de carbone, et surtout avoir un module de flexion deux fois plus grand que le PLA (6.2GPa). Il est également censé avoir une plus grande résistance au feu et une durabilité plus importante que le PLA. Autrement il est aussi facile de mise en œuvre que le PLA, possède une bonne adhésion entre couches, tout comme une bonne précision dimensionnelle et une bonne finition.

- la fibre de Bois (ColorFabb WoodFill) - Fusion 195°C // Transition vitreuse 55°C

Matériau commercialisé également par ColorFabb depuis 2014, il est aussi plus couteux (60€/kg), composé de 30% de fibres végétales. En revanche, aucune information technique n'est fournie. La mise en œuvre est semblable au PLA, mais la précision dimensionnelle et la finition sont moins bonnes. L'intérêt étant l'aspect extérieur qui rappelle vraiment le bois.

Un tableau récapitulatif avec les données des tests et les paramètres - caractéristiques de chacun des matériaux sera donné.

Tests des matériaux

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

Les tests en question sont donc :

- des tests en traction

Réalisés sur des éprouvettes normalisées, toutes obtenues et appliquées dans les mêmes conditions. Le premier essai sera une traction perpendiculairement au sens des fibres (90°), puis un second parallèlement au sens des fibres (0°).

- un test de fluage

Les filaments sont mis à pendre avec une masse à une extrémité pendant plusieurs mois.

- des tests de durabilité

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

TESTS DE TRACTION

Les tests sont donc tous réalisés sur une éprouvette normalisée.

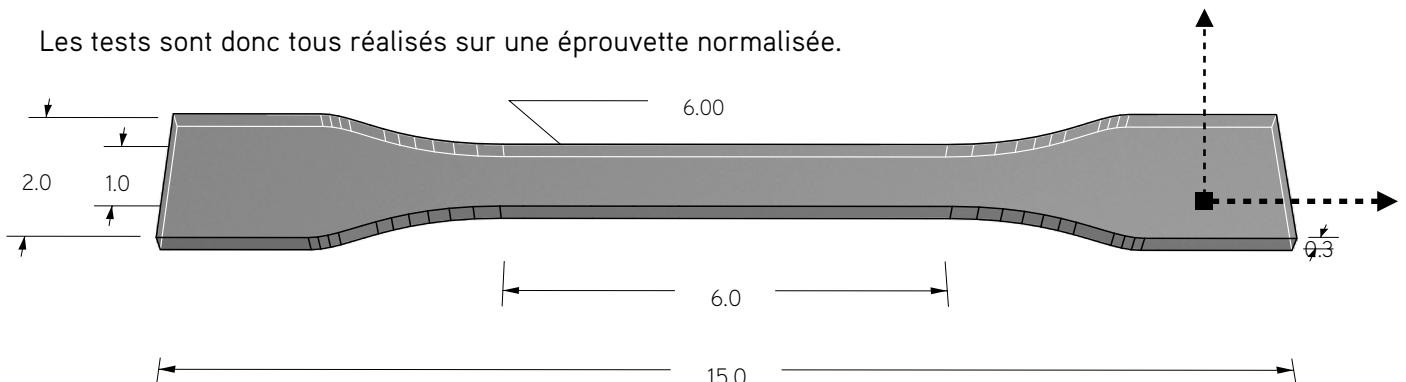
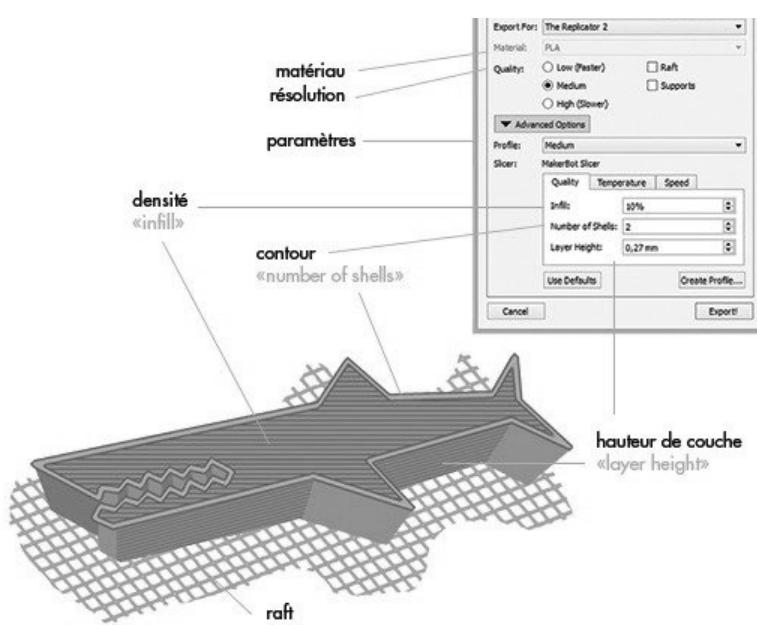


Fig.3 : Représentation de l'éprouvette normalisée avec les sens d'impression (dimensions en mm)



Les réglages d'impression utilisés :

- Remplissage : 70% linéaire
- Shells : 2 (0.8mm)
- Couche : 0.20mm
- Températures : Buse 245°C (XT-CF20) - 220°C (PLA, ABS, WoodFill), Plateau 110°C (ABS)
- 60°C (PLA, WT-CF20, WoodFill)
- Vitesses : Extrusion 30mm/s, Déplacement 40mm/s

Sans Raft, sans Supports
 Temps : 31min

Poids : 6g (WoodFill) - 6.5g (PLA, ABS) - 7g (XT-CF20)

Fig.4 : Illustration des paramètres de l'impression



Fig.5 : Photo des éprouvettes avant et après rupture aux tests (traction perpendiculaire au sens des fibres, 90°)

Traction Essai 1 : Sens 90°	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	Wood (COLORFABB)
Charge (N)	1109,02039	693,60565	997,04036	459,95564
Charge à limite élastique (N)	221,80408	138,72114	199,40806	91,99114
Contrainte maximale à rupture (MPa)	184,83673	115,60094	166,17339	76,65927
Contrainte de traction (MPa)	36,96735	23,12019	33,23468	15,33186
Déformation de traction (Déplacement %)	2,254	3,781	2,7	1,870
Déplacement de traction (mm)	2,47911	4,15931	2,94349	2,05762
Module d'Young (GPa)	3,15774	1,64337	3,25959	2,01538
Temps à rupture (s)	247,9	415,9	294,3	205,8
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	?	?

Fig.6 : Résultats du premier test de traction (traction perpendiculaire au sens des fibres, 90°)

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

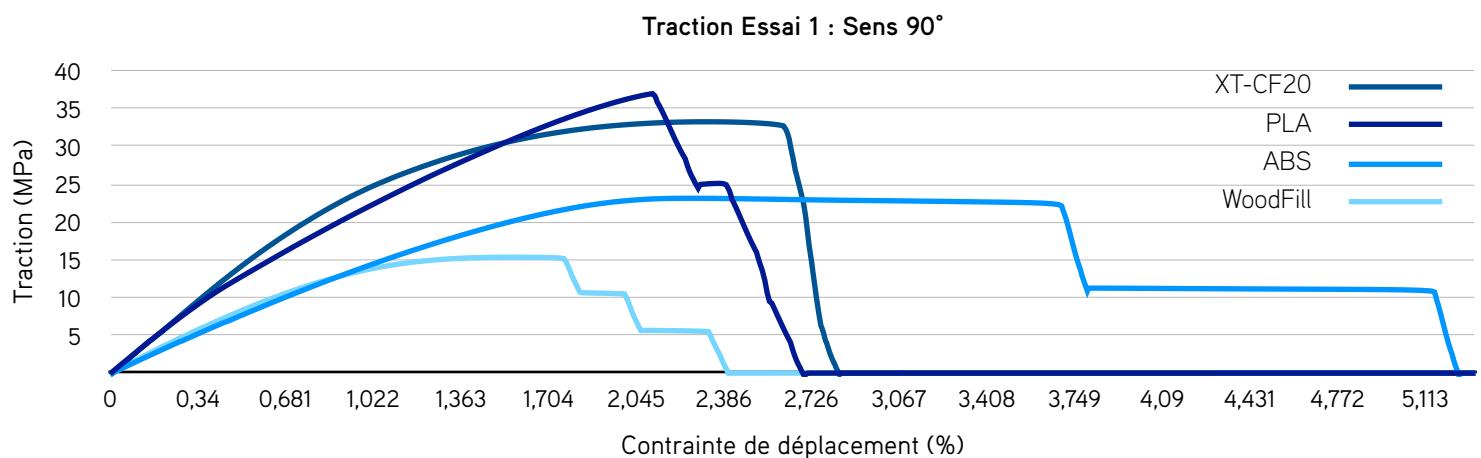


Fig.7 : Résultats du premier test de traction (traction perpendiculaire au sens des fibres, 90°)

La conclusion de ce premier test est que le PLA se démarque plutôt bien, suivi par les fibres de Carbone qui le tient de près (notamment au niveau du Module d'Young, où il le dépasse même, malgré une déformation un peu plus importante).
L'ABS ne trouve quant à lui bien en retrait, avec en plus une déformation plus bien importante avant rupture (seule sa capacité à résister au choc semble être un avantage, bien que ce paramètre n'ait pas été testé). Et les fibres de Bois, encore plus loin, avec une résistance moyenne deux fois moindre que le PLA ou les fibres de Carbone, mais une déformation moindre.

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

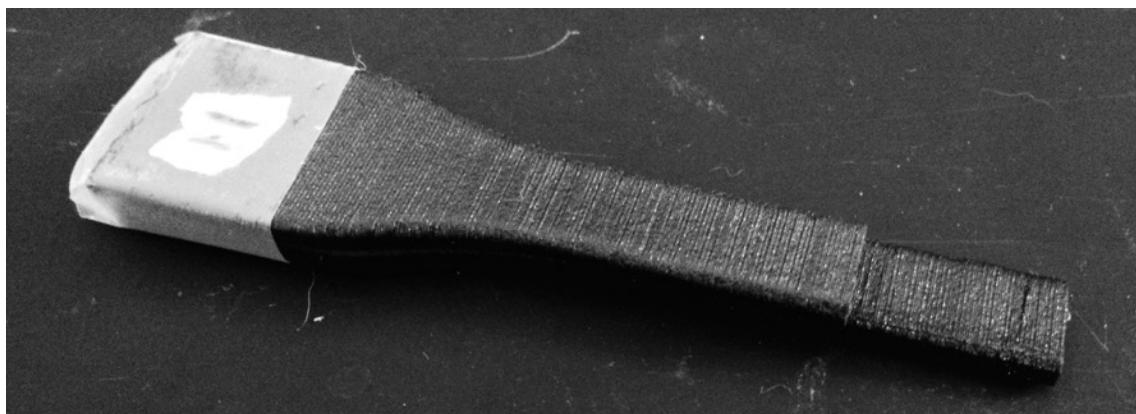


Fig.8 : Photo d'une éprouvette Carbone après rupture aux tests (traction parallèle au sens des fibres, 0°)

Les éprouvettes, au lieu d'être imprimé à l'horizontale sur le plateau, sont imprimées verticalement. L'aspect de surface est donc moins bon, et l'on peut voir distinctement les couches.

Traction Essai 2 : Sens 0°	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	Wood (COLORFABB)
Charge (N)	737,52792	693,59375	699,61078	693,60565
Charge à limite élastique (N)	147,50559	138,71877	139,92216	138,72114
Contrainte maximale à rupture (MPa)	122,92132	115,59896	116,60180	115,60094
Contrainte de traction (MPa)	24,58427	23,11980	23,32036	23,12019
Déformation de traction (Déplacement %)	1,908	2,272	1,508	2,249
Déplacement de traction (mm)	2,09897	2,49931	1,65520	2,47429
Module d'Young (GPa)	2,56251	1,65558	2,18170	1,96879
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	?	?

Fig.9 : Résultats du deuxième test de traction (traction parallèle au sens des fibres, 0°)

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

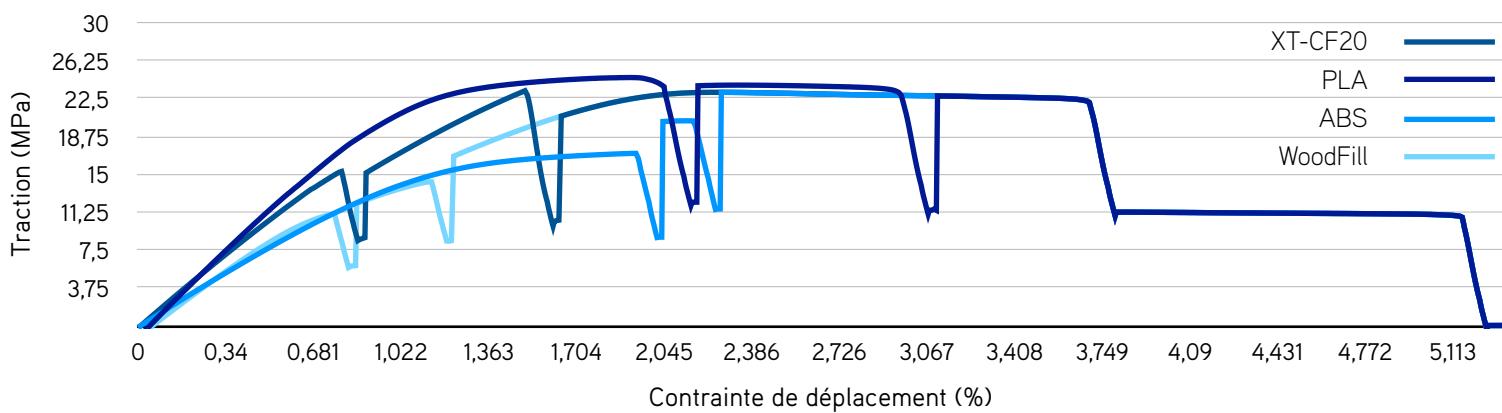


Fig.10 : Résultats du deuxième test de traction (traction parallèle au sens des fibres, 0°)

La conclusion de ce deuxième test est que le PLA se démarque aussi bien, suivi par les fibres de Carbone qui le tient toujours de près (le Module d'Young étant cette fois-ci moins remarquable, mais une déformation nettement moins importante que tous les autres).

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

On remarque que la charge à rupture ne diffère que très peu lorsque l'on tire parallèlement au sens des fibres, seuls la déformation et donc le Module d'Young sont ici significatifs.

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

TEST DE FLUAGE

Le test est réalisé sur le filament de matière directement, soit une longueur de deux mètres environ, sur 1.75mm de diamètre. Chaque filament est lesté avec un poids de 1.5kg, soit au tiers de sa charge à rupture (4.5kg). Les longueurs des filaments sont ensuite mesurées et relevées au fil du temps.



Fig.11 (gauche) : Photo du test de fluage, filaments suspendus

Fig.12 (droite) : Photos de détail des filaments, de haut en bas, PLA - Fibres de Carbone - ABS - Fibres de Bois

Test de fluage - Longueur (m)	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	WOOD (COLORFABB)	NOTES
23/04/2015	2,14	2,05	2,22	2,23	Témoin
25/04/2015	2,14 (cut)				
24/05/2015		2,01	2,22	2,24	
07/06/2015		2,01	2,22	2,27	
15/06/2015					

Fig.13 : Relevés du test de fluage

Les mesures de ce test montrent pour le moment plusieurs évolutions.

Le PLA semble s'allonger de manière minime (1 à 2mm en 2 mois), tandis que les fibres de Carbone ont l'air de jouer leur rôle parfaitement (aucun allongement visible pour l'instant), contrairement aux fibres de Bois qui se sont étirées de plusieurs millimètres (4mm). Et à l'inverse, plutôt surprenant, l'ABS a quant à lui eu l'effet inverse et semble s'être rétracté de 4mm !

Cela pourrait s'expliquer avec la variation de température observée dans la pièce du test, en effet elle peut subir suivant la température extérieure et l'ensoleillement, une variation allant jusqu'à 15°C certains jours. Cela pourrait correspondre avec la dilatation thermique des matériaux, en tout cas pour l'ABS et les fibres de Bois (dilatation thermique du PLA par exemple, est de 100 micromètres/m/°C, soit pour les deux mètres de filament suspendu : $100 \times 10^{-3} \times 2 \times 15 = 3 \text{ mm}$).

Le test est toujours en cours, les résultats continueront d'être mis à jour.

TESTS DE DURABILITÉ

Une autre série de tests de durabilité sont en cours pour évaluer la résistance de ces matériaux à deux facteurs importants : les Ultraviolets et l'Humidité.

Pour se faire, des éprouvettes identiques à celles utilisées pour les tests de traction sont conditionnées dans des environnements propices à ces expositions. Le but étant de pouvoir refaire une série de traction sur ces éprouvettes exposées à ces facteurs.

Le premier critère, la lumière ultraviolet et l'exposition au soleil sont directement effectués en plaçant les éprouvettes à l'extérieur, tout en limitant leur contact à l'eau (éprouvettes suspendues et abritées).

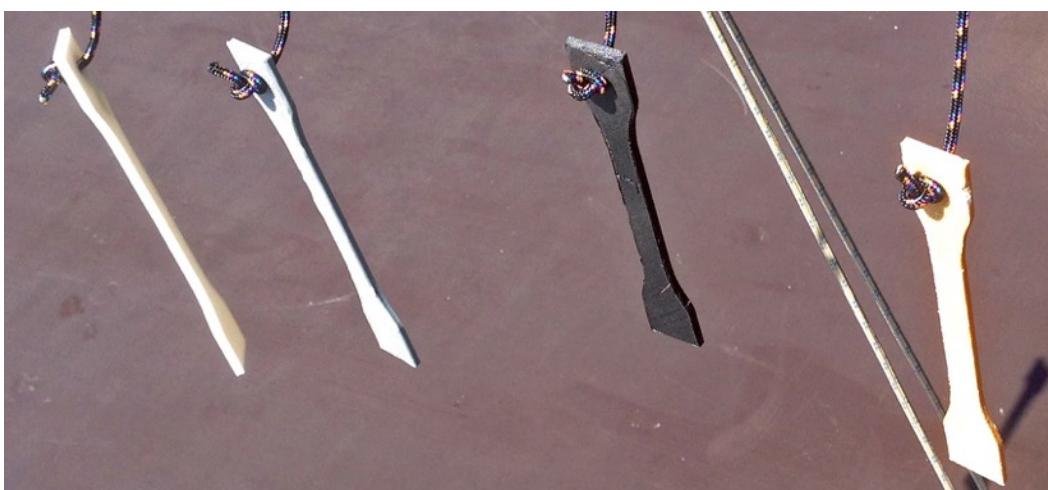


Fig.14 : Photo des éprouvettes exposées aux Ultraviolets

Les mesures sont effectuées en pesant les éprouvettes régulièrement, afin de vérifier une éventuelle prise ou perte de poids signifiant une altération ou non.

Test UV - Poids (g)	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	Wood (COLORFABB)	Notes
24/05/2015	5,98	5,35	6,95	5,60	Témoin
07/06/2015	5,98	5,37	6,97	5,70	
15/06/2015					

Fig.14 : Relevés du test d'exposition aux ultraviolets

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

Le test est toujours en cours, les résultats continueront d'être mis à jour.

Le deuxième critère est celui de l'Humidité.

Pour cela, cinq environnements sont retenus :

- 100% : correspond à une immersion totale des éprouvettes dans la solution d'eau H2O.
- 95% : corresponds à une exposition dans de l'air saturé à 95% d'humidité grâce à une solution d'eau H2O saturée avec du nitrate de potassium KNO3.
- 75% : corresponds à une exposition dans de l'air saturé à 75% d'humidité grâce à une solution d'eau H2O saturée avec du chlorure de sodium NaCl.
- 65% : corresponds à une exposition dans de l'air saturé à 65% d'humidité grâce à une solution d'eau H2O saturée avec du nitrate de sodium NaNO3.
- 33% : corresponds à une exposition dans de l'air saturé à 33% d'humidité grâce à une solution d'eau H2O saturée avec du chlorure de magnésium MgCl2.

Les pourcentages sont donnés pour une température ambiante de 25°C.

Pour les tests hors immersion, seuls les matériaux PLA et fibres de Carbone sont étudiés (en vue des tests précédents qui éliminent l'ABS et les fibres de Bois).

Test Immersion - Poids (g)	PLA (MAKERBOT)	ABS (MAKERBOT)	CARBON (COLORFABB)	Wood (COLORFABB)	Notes
24/05/2015	6,33	5,55	6,15	5,71	Témoin
07/06/2015	6,39	5,60	6,21	6,35	12h Séchage
15/06/2015					

Fig.15 : Relevés du test d'immersion

Le test est toujours en cours, les résultats continueront d'être mis à jour.



Fig.16 : Photos des tests d'humidité et des systèmes de mesures (thermomètre, hygromètre, balance)

De même que pour les ultraviolets, les éprouvettes sont pesées pour voir d'éventuelles altérations.

Test H2O - Poids (g)	PLA - KNO 3	CARBO N - KNO3	NOTES - KNO3	PLA - NAC L	CAR BON - NAC L	NOTES - NaCl	PLA - NAN O3	CARBO N - NANO 3	NOTES - NANO3	PLA - MgC L2	CARB ON - MgCl2	NOTES - MgCl2
11/06/2015	6,03	6,99	Témoin	6,60	7,10	Témoin	6,74	7,02	Témoin	6,71	7,28	Témoin

Fig.17 : Relevés des tests d'humidité

Matériaux retenus

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.

Le filament 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 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 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.

Post-traitements ?

Expérimentations Logicielles

Le but de cette approche logicielle est de pouvoir isoler et tester les principes de parcours d'outil et d'optimisation topologique sur un nœud ou un assemblage bien précis. Il servira ensuite comme démonstrateur final pour l'application de toutes ces expérimentations.

Parcours d'outil

Etant donné que le sujet a été déjà étudié par la Startup 3DMatter comme stipulé au début, je vais présenter rapidement les points sur lesquels l'utilisateur peut jouer pour modifier son parcours et donc la pièce finale.

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

- les Températures : extrusion, plateau
- les Vitesses : déplacement, en extrusion, parfois plus précis (remplissage, pourtour, supports...)
- la Densité : type de pattern, pourcentage (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
- le Multi-materiau : si plusieurs buses d'extrusion

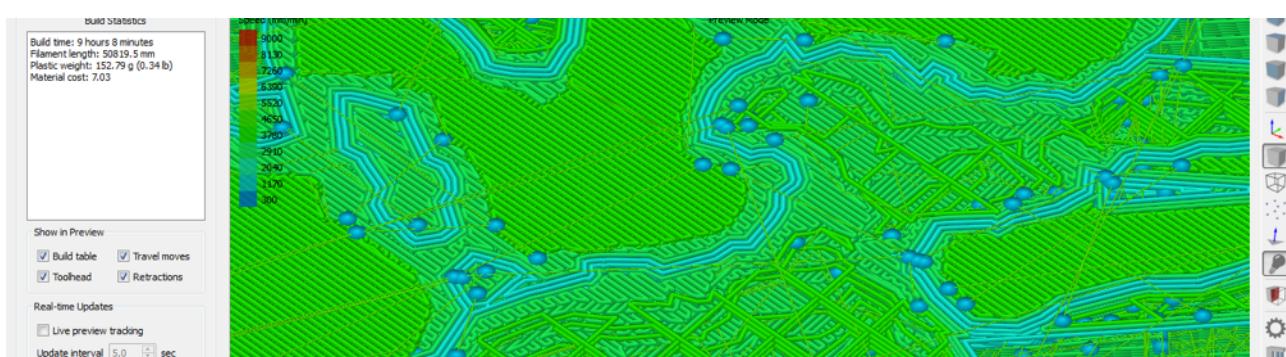


Fig.18 : Screenshot d'un détail d'une simulation de parcours d'outil (densités variables des remplissages et pourtour)

Optimisation et distribution de la matière

Une autre recherche intéressante pour la fabrication d'une pièce de structure 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, dit d'optimisation topologique, car il permet de réduire à la fois la quantité de matière utilisée et donc le temps 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 3D et Rhinocéros 3D, entièrement paramétré 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 donc réalisées sur SolidThinking Inspire.

Enfin, l'impression et la gestion des densités sont effectuées avec le générateur de parcours d'outil de MakerBot (qui justement ne sait pas gérer plusieurs densités au sein d'une même pièce), et Simplfy3D qui est actuellement le plus complet sur le marché et gère cette option (parmi tant d'autres).

GÉNÉRATION DU NŒUD

Screenshots Grasshopper, Rhinoceros

Fig.19 :



Fig.20 : Photo du nœud d'assemblage

SIMULATION DES CHARGES

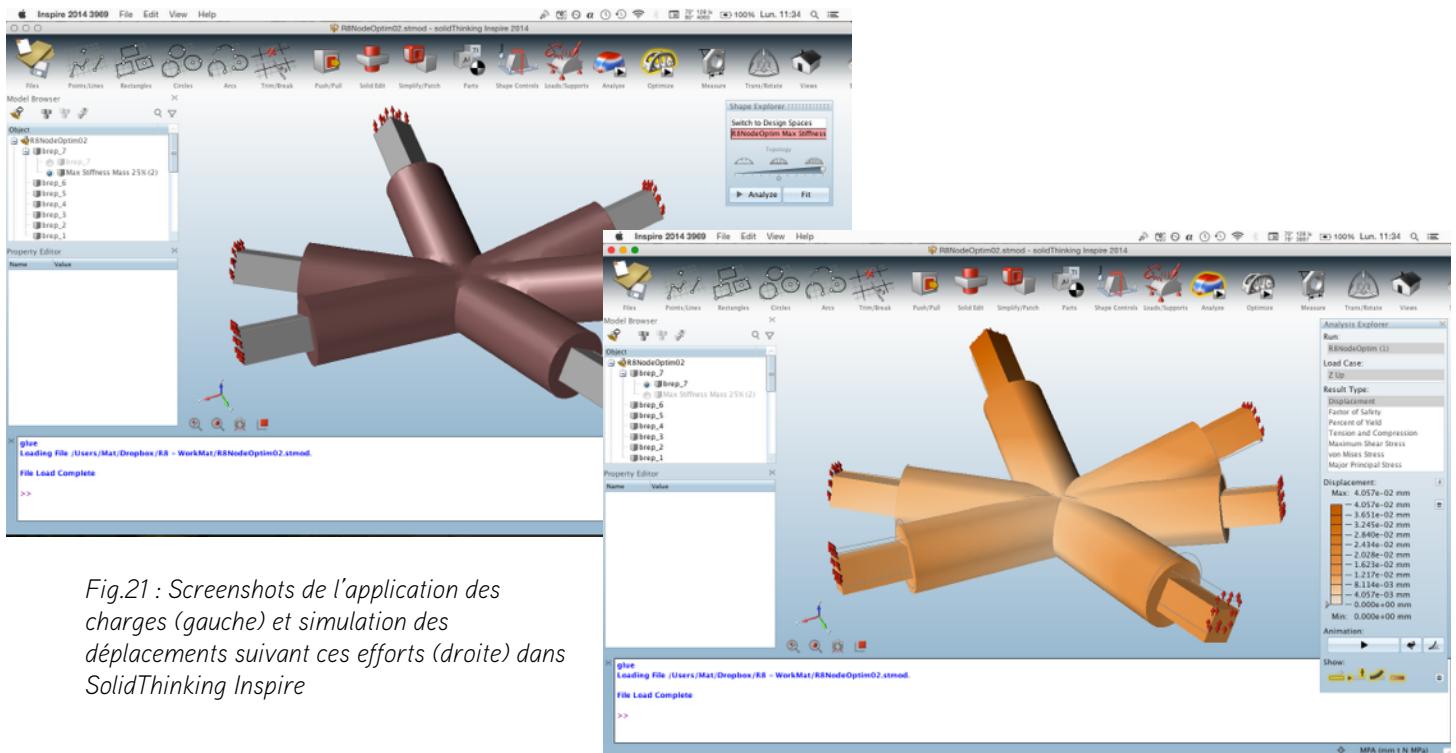


Fig.21 : Screenshots de l'application des charges (gauche) et simulation des déplacements suivant ces efforts (droite) dans SolidThinking Inspire

OPTIMISATION TOPOLOGIQUE

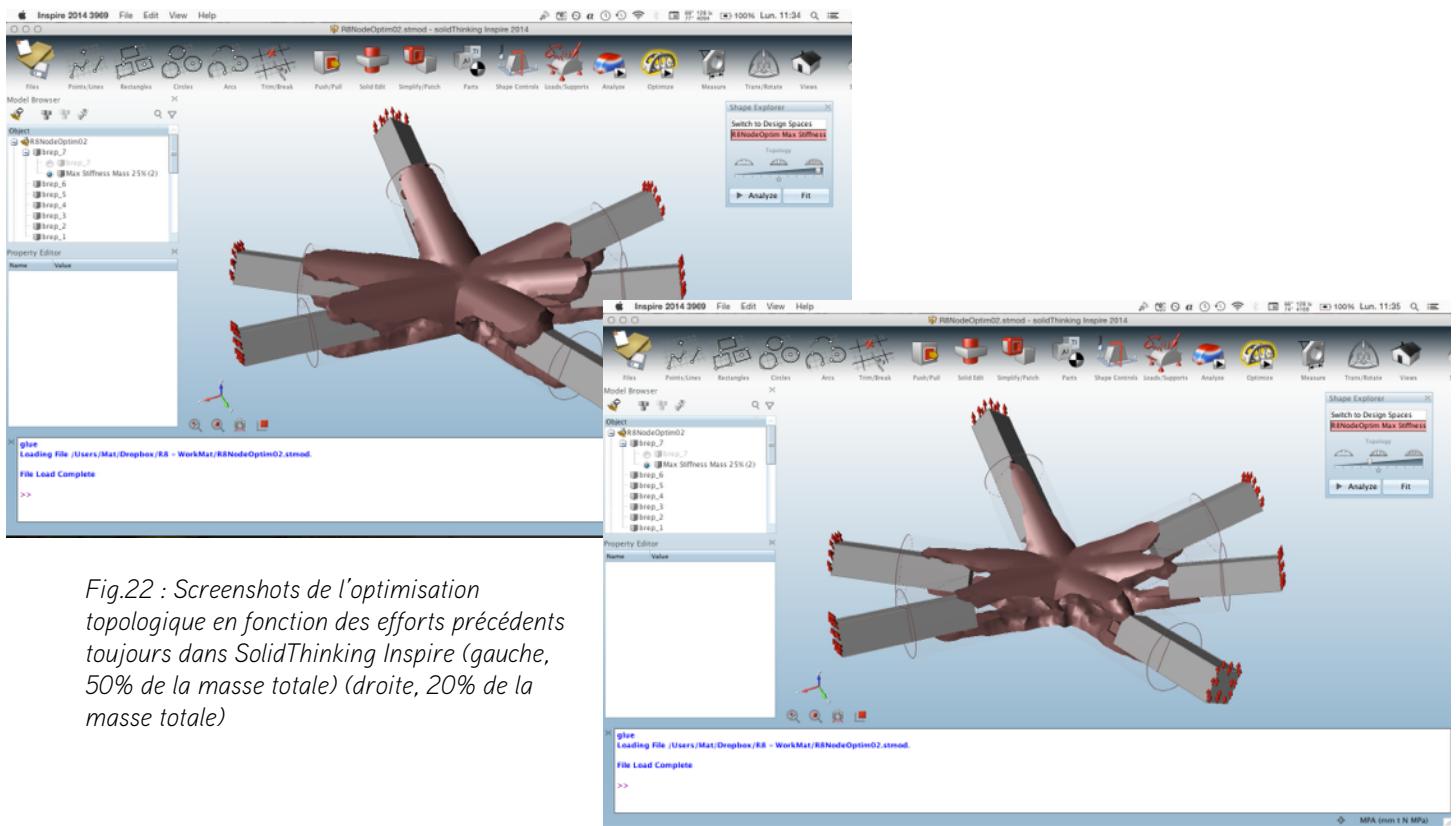


Fig.22 : Screenshots de l'optimisation topologique en fonction des efforts précédents toujours dans SolidThinking Inspire (gauche, 50% de la masse totale) (droite, 20% de la masse totale)

GESTION DES DENSITÉS

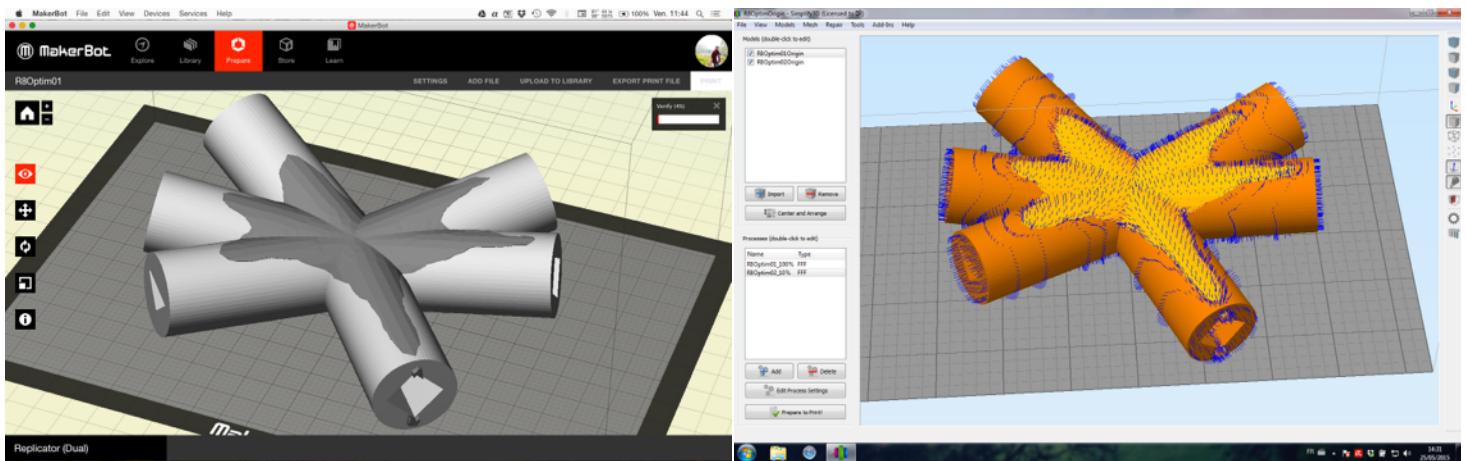


Fig.23 : Screenshots du nœud optimisé dans les générateurs de parcours d'outil MakerBot (gauche) et Simplify3D (droite)

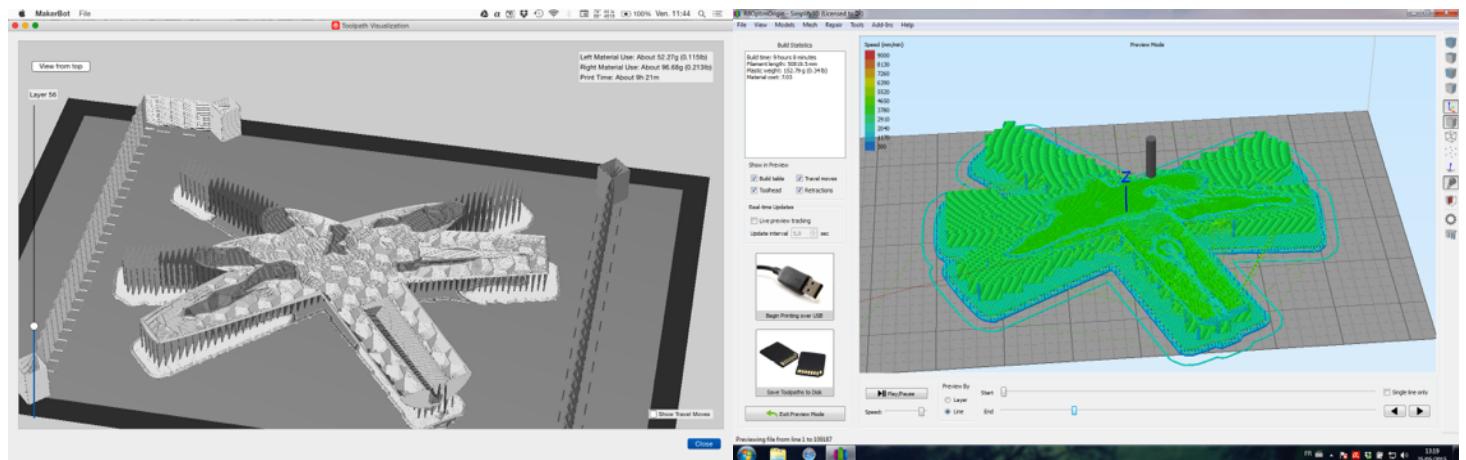


Fig.24 : Screenshots du nœud dans MakerBot (g., pas de gestion des densités) et Simplify3D (d., gestion des densités)

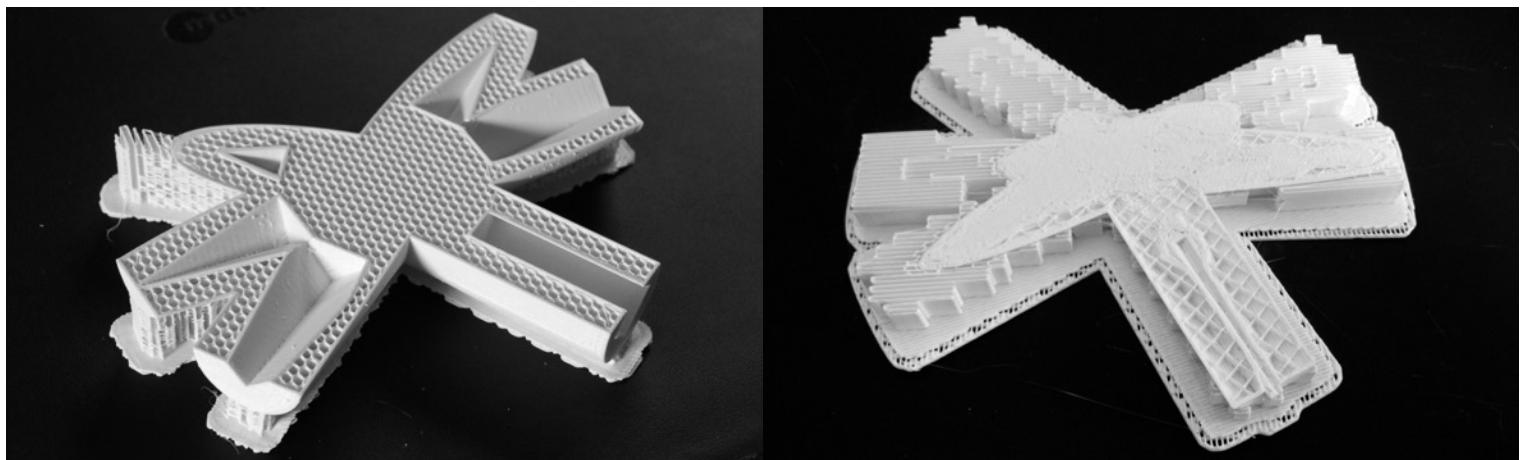


Fig.25 : Photos d'une section du nœud non optimisé (g., MakerBot) et optimisé (d., Simplify3D) en PLA

Le cœur central est bien plein à 100% et le reste à 30, tel qu'il a été réglé dans le parcours d'outil en assignant chaque volume.

Reverse engineering : Simulation des charges sur parcours d'outil

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

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

Un point intéressant serait donc de reprendre les données du parcours d'outil générer, d'en reconstruire un modèle 3D s'approchant au maximum de la géométrie qui serait obtenu par impression 3D, et revenir simuler ces efforts sur ce nouveau modèle afin de pouvoir vérifier avant production la qualité de la pièce finale.

Cette étape est toujours en cours, malgré une difficulté technique importante. En effet, la relecture des données est déjà en place, la possibilité de reprendre les points cibles du parcours et d'en régénérer un modèle 3D est également au point. Mais le problème est que ce modèle n'est pas directement exploitable pour appliquer des calculs dessus, le fichier n'est pas sous volumique avec des liaisons propres entre les couches et tubes créés, rendant très lourd et même impossible les opérations dessus. Chose à approfondir donc.

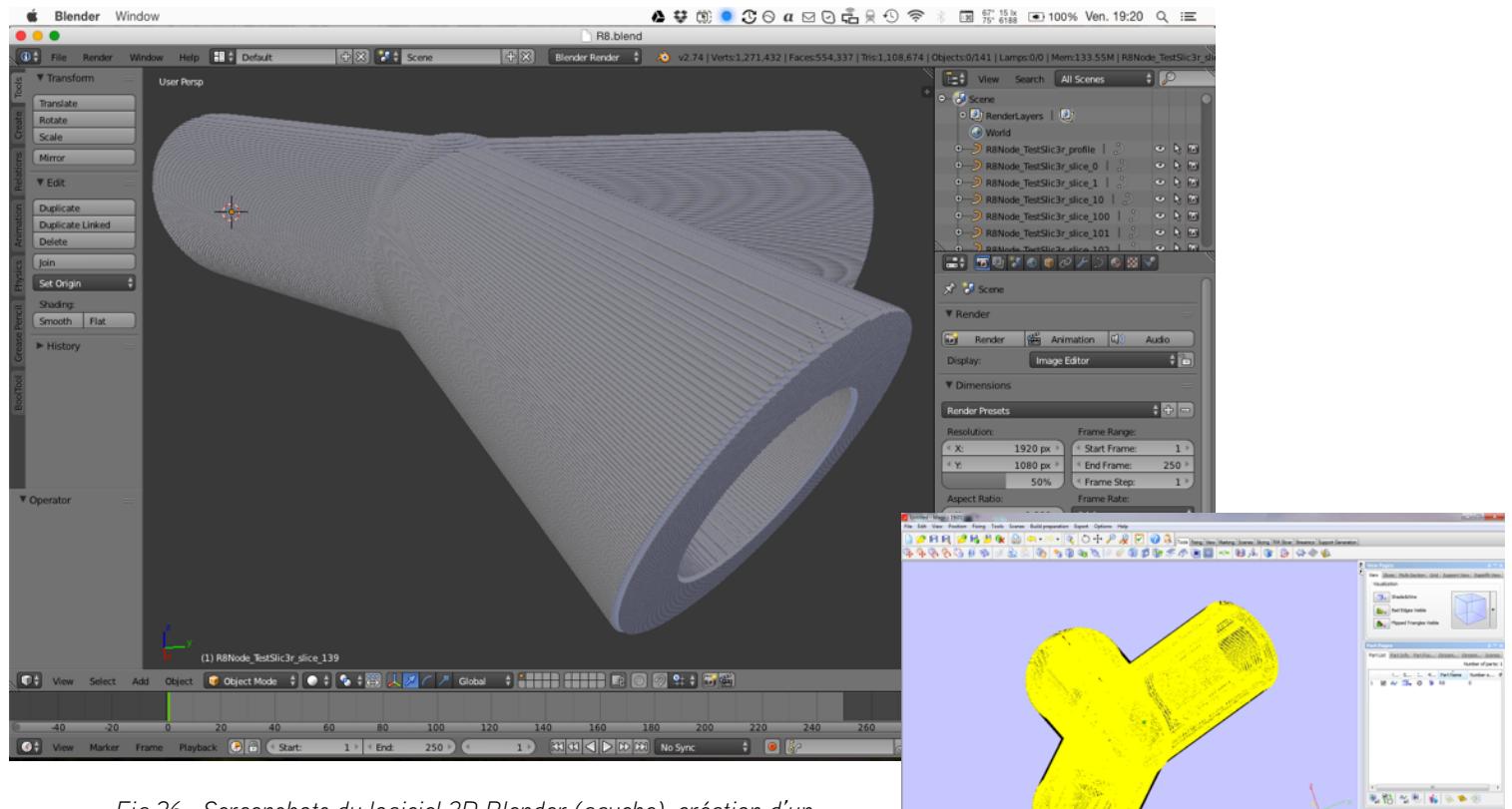


Fig.26 : Screenshots du logiciel 3D Blender (gauche), création d'un modèle 3D à partir d'un fichier Gcode. Et Magics (droite), montrant en jaune les arrêtes nécessitant des réparations

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

Expérimentations Echelle 1:1

La dernière étape est donc l'essai échelle 1 des matériaux et méthodes vus précédemment.
Pour se faire, nous aurons donc deux nœuds d'assemblages cette fois-ci simples, en forme d'Y afin de pouvoir bloquer une extrémité en encastrement, et appliquer les charges de flexion sur le bras restant.

Nœud non optimisé

Le premier test porte sur un nœud brut de décoffrage, employant uniquement les capacités du générateur de parcours d'outil, aucune optimisation topologique de la géométrie n'a encore eu lieu.

Les réglages utilisés sont :

- Remplissage : 30% linéaire
- Shells : 2 (0.8mm)
- Couche : 0.30mm
- Températures : Buse 245°C (XT-CF20) - 220°C (PLA, ABS, WoodFill), Plateau 110°C (ABS) - 60°C (PLA, WT-CF20, WoodFill)
- Vitesses : Extrusion 30mm/s, Déplacement 40mm/s
- Sans Raft, sans Supports

Temps : 6h04min

Poids : 121g (WoodFill) - 121g (PLA, ABS) - 121g (XT-CF20)



Fig.27 : Photos des nœuds non optimisés (de gauche à droite et haut en bas, PLA - Fibres Carbone - ABS - Fibres Bois)

Un essai en flexion est ensuite appliqué.

// En cours !

Nœud optimisé

Le deuxième test porte sur le même nœud, mais cette fois en ayant appliqué une optimisation topologique de la géométrie interne.

Les charges simulées sont :

-

Les réglages utilisés pour l'impression sont identiques à ceux du nœud non optimisé.

Comme pour le nœud précédent, on applique un test de flexion.

// En cours !

Conclusion

Le but de cette recherche est donc d'obtenir un guide pour le choix d'un matériau propice à la réalisation de pièces d'assemblage mécaniques 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 propice à cette utilisation à condition de rester dans un environnement relativement contrôlé, en particulier au niveau de l'humidité ambiante.

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

// En cours !

Assemblages Mécaniques

- A. SANCHEZ SAMANO, 2014, *Assemblages de bois appliqués à la robotique architecturale*, mémoire AMC2
- FVB-FFC, 2013, *Les assemblages bois*, éditions fvb-ffc Constructiv
- J. OLSSON, 2012, *Form finding and size optimization, Implementation of beam elements and size optimization in real time form finding using dynamic relaxation*, mémoire Chalmers University of Technology
- T. NOLL, H. LHUISSIER, 2004, *Assemblages en bois*, éditions Eyrolles
- W. GRAUBNER, 2003, *Assemblages du bois : l'Europe et le Japon face à face*, éditions Vial
- <http://matsysdesign.com/tag/form-finding/>
Articles sur les Shell form finding (GridShell, HexShell...)
- <http://3dprint.com/71597/3d-printed-furniture-joints/>
Article sur l'impression de nœuds d'assemblage pour mobilier, 2015
- <http://www.nudel.it>
Système de construction par nœuds d'assemblage 3D, logiciel de génération des nœuds, 2015
- <http://www.christiansjostrom.com/LINK>
Structures modulaires d'un designer avec pièces de jonctions articulées imprimées en 3D, 2015
- http://mkmra2.blogspot.fr/2014/08/cnc-cut-wood-joinery.html?utm_content=buffer86987&utm_medium=social&utm_source=facebook.com&utm_campaign=buffer
Article sur le design et la fabrication de jonctions en bois avec machines CNC, 2015
- <http://patharc.com/portfolio/asterism-series>
Pièces de jonction en impression 3D adaptables à n'importe quelle géométrie, 2015
- <http://flexiblestream.org/project/50-digital-wood-joints>
Fichiers de découpe d'assemblages bois pour usinage numérique, 2014
- <http://www.txnmydesign.com/grid-shell.html>
Réalisation de gridshells à partir de nœuds de jonction imprimés en 3D, 2014
- <http://weburbanist.com/2014/04/22/3d-printable-connectors-make-diy-furniture-assembly-easy/>
Design de pièces de jonction paramétriques pour mobilier, 2014
- <http://69.195.124.128/~ruptcouk/2013/09/17/control/>
Design de pièces de jonction pour mobilier, 2013
- <http://www.wikihouse.cc>
Plateforme collaborative pour préfabrication d'éléments d'assemblages de maison, 2013
- <http://makezine.com/2012/04/13/cnc-panel-joinery-notebook/>
Séries de découpes d'assemblages bois pour usinage numérique ou découpe laser, 2012
- http://patharc.com/portfolio/re_stock
Pièces de jonction paramétriques pour assemblages, 2012
- <http://www.instructables.com/id/Asterism-Series/?ALLSTEPS>
Pièces de jonction paramétriques pour assemblages, 2012
- <http://gt2p.com/filter/Digital-Crafting/Suple-Series>
Design de pièces de jonction entre différentes branches, 2011

Impression 3D

- M. GRIFFIN, 2015, *Design and Modeling for 3D Printing*, éditions Maker Media
- J. T. BELTER, A. M. DOLLAR, *Strengthening of 3D Printed Fused Deposition Manufactured Parts Using the Fill Compositing Technique*, 2015, PLOS One
- B. CHAPMAN, S. DESAI, M. MURAOKA, T. VIDOLOVA, 2014, *Investigating Methods of Prototyping with ABS*, étude d'un étudiant au Franklin W. Olin College of Engineering (Boston)
- B. LUYT, S. N. Bernier, T. Reinhard, 2014, *Impression 3D Pas à Pas*, éditions Marabout, collection "Loisirs Illustrés"
- B. M. TYMRAK, M. KREIGER, and J. M PEARCE, 2014, *Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers Under Realistic Environmental Conditions*, revue Materials & Design
- M. B. STOKES, 2013, *3D Printing for Architects with MakerBot*, éditions Packt Publishing
- N. UMETANI, R. SCHMIDT, 2013, *Cross-sectional Structural Analysis for 3D Printing Optimization*, revue Autodesk Research
- H. LIPSON, M. KURMAN, 2013, *Fabricated the new world of 3D printing, the promise and the peril of machine that can make (almost) anything*, éditions John Wiley & Sons

- B. PETTIS, A. KAZIUNAS, J. SHERGILL, 2013, *Imprimer en 3D avec la Makerbot*, éditions Eyrolles, collection "Serial makers"
- M. BERICHEON, B. LUYT, 2013, *L'Impression 3D*, éditions Eyrolles, collection "Serial makers"
- A. KAZIUNAS, 2013, *Make: 3D Printing: The Essential Guide to 3D Printers*, éditions Maker Media
- C. ANDERSON, 2012, *Makers : La nouvelle révolution industrielle*, éditions Pearson, collection "Les temps changent"
- B. EVANS, 2012, *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing*, éditions APress, collection "Technology in Action"
- <http://www.imprimante3dfrance.com/filaments.html>
Fournisseur consommables (ABS, Nylon, PETT, Flexibles...), Asnières-sur-Seine
- <http://www.filimprimante3d.fr/50-recherche-par-criteres>
Fournisseur consommables avec possibilité de filtrage par critères (rigidité, durabilité...)
- <http://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic-polymers/polymer-fibers/synthetic-fibers/material-properties-of-polyamide-fiber-nylon-fiber-pa-fiber.html#properties>
Site web répertoriant les caractéristiques de certains polymères (PLA, Nylon, PETT...)
- <http://blog.makeprintable.com/g-code-reverser/>
Recréation de géométrie 3D à partir d'un fichier de parcours d'outil
- <http://www.instructables.com/id/3D-Printed-Molds-Casting-Tutorial-Complex-Shapes/?ALLSTEPS>
Méthode de moulage à partir d'impression 3D (Silicone), 2015
- <http://www.instructables.com/id/TestrBot-The-300-Universal-Test-Machine/?ALLSTEPS>
Fabrication d'une machine d'essai Open Source, 2015
- <http://www.3ders.org/articles/20150316-flexible-modular-3d-prints-bend-and-stretch-without-losing-their-shape.html>
Article sur l'impression d'objets modulaires avec armature métallique, 2015
- <http://www.3ders.org/articles/20150314-create-aged-metal-objects-by-cold-casting-your-3d-prints.html>
Article sur le moulage métal à froid à partir de pièces imprimées, 2015
- <http://www.3ders.org/articles/20150207-new-infographic-details-how-to-pick-the-right-3d-printing-filament-for-your-next-project.html>
Article sur le choix des technologies d'impression 3D en vue de certains domaines d'utilisation, 2015
- <http://www.3ders.org/articles/20141010-a-few-ways-to-strengthen-3d-printed-parts.html>
Article sur la résistance de pièces imprimées 3D (Géométrie, Réglage, Post-traitement, Moulage), 2014
- <http://3dtopo.com/lostPLA/>
Moulage métal à partir de pièces perdues imprimées en 3D en PLA, 2014
- <http://www.3ders.org/articles/20140228-open-source-3d-printed-parts-often-stronger-than-proprietary-versions.html>
Article sur la résistance des pièces imprimées en 3D, 2014
- <http://3dprint.com/14533/3d-print-material-test/>
Article sur des tests de résistance de certains matériaux d'impression 3D (ABS, Nylon, PLA...), 2014
- <http://makezine.com/projects/make-34/skill-builder-finishing-and-post-processing-your-3d-printed-objects/>
Article sur les post-traitements, réparation de pièces imprimées en PLA / ABS, 2014
- <http://makezine.com/2014/04/24/stress-testing-injected-hot-glue-for-solid-fast-cheap-3d-prints/>
Article sur des tests de résistance avec injection de colle dans les pièces imprimées en 3D, 2014
- <http://vr.sdu.edu.cn/~lulin/3DP/build-to-last.html>
Etude sur la résistance et l'optimisation de forme d'une pièce imprimée en 3D, 2014
- <http://www.topolabs.com>
Logiciel (abandonné) sur l'extrusion FDM continue et non par couche, 2014
- <http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-materials-bendlay-laywood-laybrick/>
Article récapitulant les différents plastiques pour imprimante 3D, 2014
- <http://www.3ders.org/articles/20131222-printing-porous-and-fibrous-3d-objects-with-new-filament-line-poro-lay.html>
<http://www.3ders.org/articles/20141006-3d-printing-a-sponge-using-layfomm-filament-flexible-viscoelastic-properties.html>
Articles sur un nouveau filament flexible et poreux (Poro-Lay), 2013 - 2014
- <http://airwolf3d.com/2013/11/30/7-steps-to-a-stronger-abs-part-with-resin/>
Post traitement de pièces imprimées en 3D par application de résine epoxy, 2013
- <http://www.theverge.com/2013/12/16/5215910/nervous-system-kinematics-3d-printing-app>
Article sur une application pour créer des formes souples articulées en impression 3D, 2013
- <http://www.3dpvd.org/wp/2013/02/soluble-support-material/>

<http://www.adafruit.com/blog/2013/10/03/makerbot-popularizes-hips-support-material-with-release-of-makerbot-dissolvable-filament-3dthursday-3dprinting/>

Articles sur un type de supports solubles en impression 3D, 2013

- <http://www.3ders.org/articles/20121031-high-strength-nylon-3d-printing-material-available-for-sale.html>

Article sur le Nylon en impression 3D, 2012

- <http://hpcg.purdue.edu/?page=publication&id=164>

Etude sur la résistance et l'optimisation de forme d'une pièce imprimée en 3D, 2012

- <http://www.tridimake.com/2012/12/3d-printing-plastic-filaments-kinds-and.html>

Article récapitulant les différents plastiques pour imprimante 3D, 2012

- <http://makezine.com/projects/make-42/fun-with-flexibles/>

Article sur la flexibilité de certains filaments pour impression 3D

- <https://learn.adafruit.com/3d-printing-with-ninjaflex?view=all>

Article sur l'impression 3D avec des filaments flexibles

Annexe : Expériences physiques de résistance et durabilité de matériaux d'impression 3D (FDM)

Matériaux :

- ColorFabb XT-CF20 (Filament carbone 20% fibres, aspect résistance)
- ColorFabb WoodFill (Filament bois 30% fibres, aspect esthétique)
- RepRapper ABS (générique)
- RepRapper PLA (générique, biodégradable)

Matériels :

- Imprimante 3D (MakerBot Replicator 1 Dual / personnel, ENSAM FabLab)
- Filaments 3D (Carbone, Bois, ABS, PLA)
- Solutions Salines (KNO₃, NaCl, NaNO₂, MgCl₂)
- Thermomètre - Hygromètre (Mesures / personnel)
- Balance (Dégradations / personnel)
- Machine d'essais (Traction / personnel, ENSAM PIMM)
- Dynamomètre (Charges / personnel)

Logiciels :

- Grasshopper 3D / Rhinoceros 3D
- MakerBot Desktop / Simplify3D
- SolidThinking Inspire

Commandes :

- Imprimante3Dfrance (189,19€)
- Solutions Salines (8,50€)
- Peson 40kg (4,57€)
- Tube acier + serre-joints (13,75€)
- Thermomètre - Hygromètre (3,73€)
- Balance précision (7,97€)

Partenariats :

- Imprimante3Dfrance (réductions)
- My3Dmatter (Startup ENSAM)
- Univ-Paris13 (Doctorant chimie)

Résultats attendus :

- Filament carbone plus propice en durabilité et résistance pour un cout raisonnable (60€/kg)
- Filament PLA propice si post-traitement ou en environnement sec pour un cout dérisoire (30€/kg)
- Filaments bois intéressant en résistance et surtout aspect pour pièces complexes (55€/kg)
- Possibilité et avantage de produire des pièces complexes et non standards en 3D, car cout dérisoire face à l'industrie et production hyper simplifiée. Correct en résistance, mais aussi durabilité, et possibilité de multiples aspects et textures
- Différentes manières (outils, programmes) pour générer le parcours d'outil, influant sur l'aspect et la résistance
- Rapidité de mise en œuvre, cout faible, et résistance comparée aux autres technologies d'impression 3D (SLS, SLA puis coulage béton)