

Avec l'impression 3D, il y a matière à étudier

MATHIEU VENOT*

Suivant le matériau utilisé et les réglages appliqués au moment de l'impression, une pièce mécanique aura des résistances et durées de vie différentes. L'objectif de cet article est de fournir un guide-conseil pour le choix d'un matériau en fonction de ses caractéristiques initiales propres et surtout de l'usage envisagé pour la pièce réalisée.

Cet article porte sur l'utilisation de l'impression 3D pour la réalisation de pièces d'assemblage sur des structures d'échelle architecturale; les résultats sont néanmoins transposables dans le domaine mécanique. L'idée est de partir d'un matériau type d'impression 3D comme base de travail, d'étudier ses contraintes, charges et forces en appliquant plusieurs tests et essais (résistance, dégradation...), afin d'en déduire des cas spécifiques d'utilisation (traction, compression, cisaillement, flexion...).

L'évolution et l'utilisation des nouvelles technologies en architecture remettent en question les méthodes de mise en œuvre existantes. Grâce aux outils de conception et fabrication numérique, la norme et le standard n'ont désormais guère de sens. Il est aujourd'hui possible de concevoir des objets uniques à géométries complexes et variables, mais aussi de supplanter et d'optimiser certaines méthodes traditionnelles. Le découpage numérique de panneaux de bois et la préfabrication en sont des exemples: précision, rapidité, coût 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 japonais¹), pour pouvoir être réalisés par ces outils numériques (fraisage CNC 3 axes et/ou robotique industrielle²). D'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 structure³, type Gridshell par exemple.

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

MOTS-CLÉS

matériaux,
résistance des matériaux,
matière et structure,
architecture
et construction,
procédé

– 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 sur-mesure;

– avoir des gains de temps. Pas besoin d'usiner chaque poutre indépendamment. Utilisation de pièces industrielles standard (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 coûts 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, refondre 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 l'impression 3D par extrusion dite FDM/FFF pour *Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication*, soit « dépôt de matière fondue/fabrication par filament fondu ».

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

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 métal⁴. 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

* Étudiant en master d'architecture (École nationale supérieure d'architecture de Paris Malaquais), co-fondateur de DixieVR

Technology	Selective laser sintering						Fused deposition modeling				Projection (objet)		Stereo-lithography	Wax 3D printing	Wax 3D Printing + molding	Direct metal laser sintering		Zcorp
	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			
High heat/chemical applications					X				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 ³)	680 × 370 × 560	200 × 200 × 200	310 × 310 × 600	311 × 310 × 600	312 × 310 × 600	313 × 310 × 600	600 × 500 × 600	600 × 500 × 600	914 × 610 × 914	914 × 610 × 914	290 × 190 × 147	305 × 605 × 102	1500 × 750 × 500	80 × 45 × 80	80 × 45 × 80	250 × 250 × 220	250 × 250 × 220	254 × 381 × 203
Minimum wall thickness (mm)	0,8	0,8	1	1	0,8	1	1	1	0,8	0,8	2	2	2	0,5	0,5	0,3	0,3	2
Minimum detail (mm)	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,1	0,1	0,4
Layer thickness (µm)	60-150	60-150	150	150	150	150	120-330	120-330	120-330	120-330	14-28	28	50-150	25	25	30	30	100

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

l'usage de supports additionnels pour des pièces en porte-à-faux 1.

Le principe de fonctionnement d'une imprimante 3D FDM est simple 2 : une buse chauffante extrude un matériau thermoplastique sous forme de filament (souvent entre 170 et 260 °C), qui se dépose ensuite en plusieurs couches (épaisseur entre 0,08 et 0,38 mm) sur un plateau afin de composer au fur et à mesure la pièce finale.

Une question importante se pose rapidement : 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 un filament donné ou une pièce d'essai.

Expérimentation

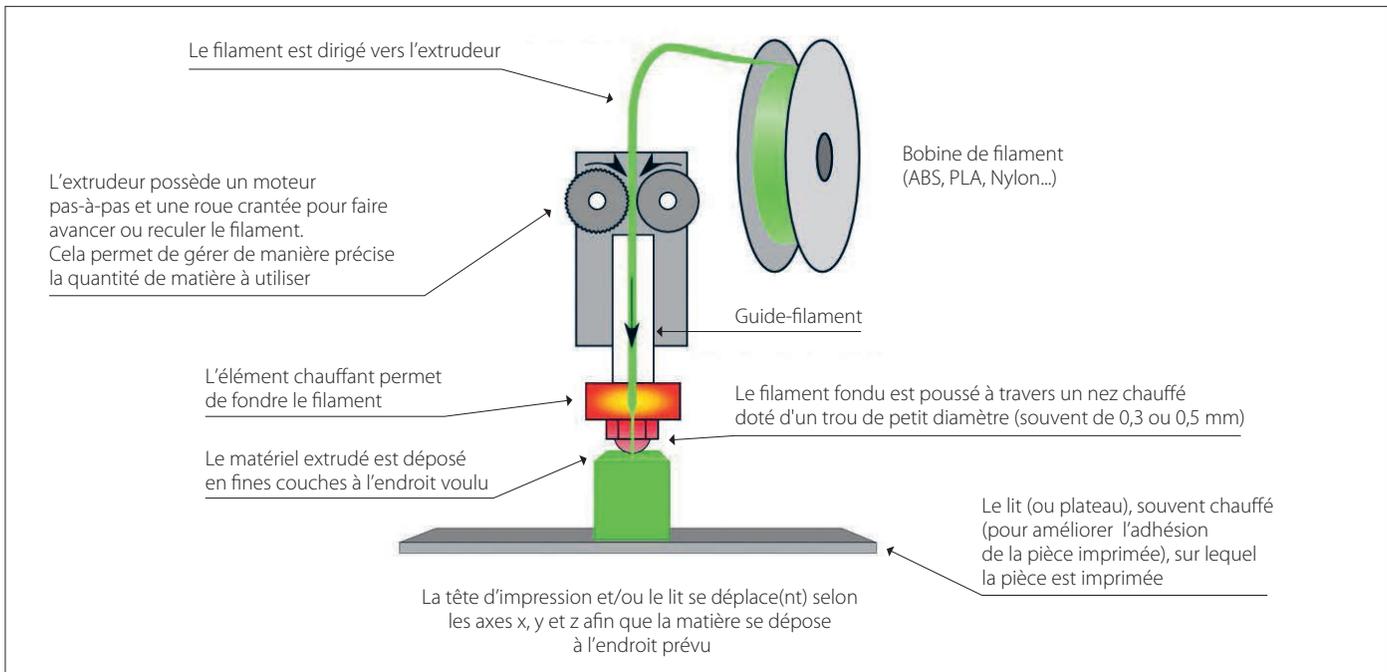
Après ces observations et recherches préalables, l'objectif est de réaliser une série de tests sur des matériaux usuels d'impression 3D FDM et de tirer des conclusions quant à ces valeurs de résistances et leurs potentielles applications.

1. Graubner W., 2003, *Assemblages du bois : l'Europe et le Japon face à face*, éditions Vial.

2. <http://makezine.com/2012/04/13/cnc-panel-joinery-notebook/>
<http://flexiblestream.org/project/50-digital-wood-joints>

3. Sanchez Samano A., 2014, *Assemblages de bois appliqués à la robotique architecturale*, mémoire AMC2.

4. Tarifs Sculpteo France 2015.



2 Fonctionnement d'une imprimante 3D FDM/FFF – adapté de <http://thingiverse.com/thing:29432> par edurobot.ch

Caractéristiques des matériaux	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBo)	Carbone (ColorFabb)	Bois (ColorFabb)
Transition vitreuse (°C)	60,00	105,00	75,00	55,00
Fusion (°C)	150,00	210,00	220,00	195,00
Prix (\$/kg)	30,00	30,00	60,00	60,00
Résistance	++++	+++	+++++	+
Précision	+++++	++	++++	+++
Finition	+++++	++	++++	++
Fabricant	Générique	Générique	ColorFabb	ColorFabb

3 Récapitulatif des différents matériaux testés

Les tests abordés dans cet article concernent l'expérimentation physique avec les matériaux imprimés. Dans un futur article seront abordés les tests concernant les aspects logiciels et de parcours d'outil, et les méthodes de dépose de la matière.

Choix des matériaux

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

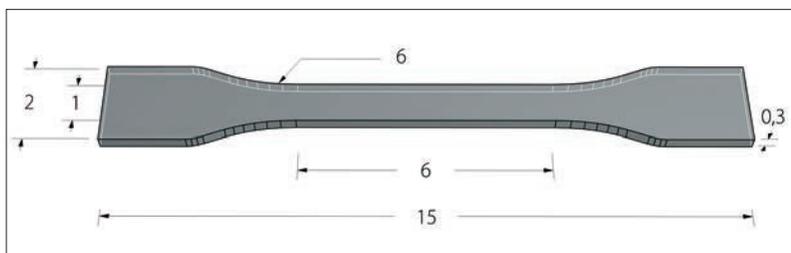
Les matériaux privilégiés sont :

– le PLA générique (acide polylactique) : fusion 150 °C/transition vitreuse 60 °C. Matériau le plus répandu en impression 3D FDM, le moins coûteux (30 \$/kg), facile à mettre en œuvre (faible rétraction), bonne adhésion entre couches, bonne précision dimensionnelle et bonne finition. L'inconvénient majeur est qu'il est biodégradable ;

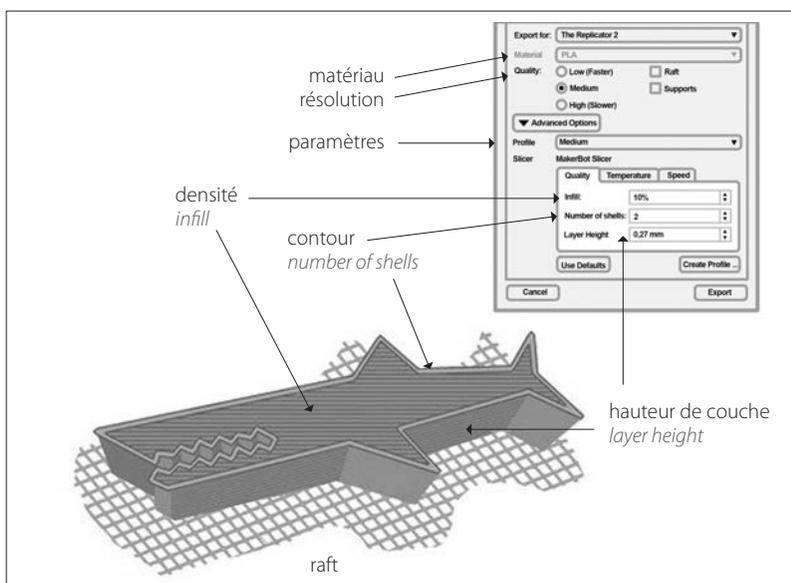
– l'ABS générique (acrylonitrile butadiène styrène) : fusion 210 °C/transition vitreuse 105 °C. Matériau très répandu également (antérieur historiquement au PLA), peu coûteux (30 \$/kg), mais aujourd'hui mis de côté par rapport au PLA. Nécessité d'un plateau chauffant, précision dimensionnelle moindre à cause des rétractions, finition moindre due à une adhésion faible entre couches. 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 coûteux que le PLA ou l'ABS (60 \$/kg), mais plus dense que les deux autres (1,35 g/cm³), composé de 20 % de fibres de carbone et surtout un module de flexion deux fois plus grand que le PLA (6,2 GPa). Il est également censé avoir une plus grande résistance au feu et une durabilité plus importante que le PLA. 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 coûteux (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 celui du bois⁵.



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



5 Illustration des paramètres d'impression (LeFabShop)



6 Éprouvettes avant et après rupture aux tests (traction longitudinale)

Tests des matériaux

Afin de déterminer quel matériau peut être propice pour une application donnée, 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. Ils sont réalisés sur des éprouvettes normalisées et appliqués dans les mêmes conditions. Le premier essai sera une traction parallèlement au sens des fibres (0°, traction longitudinale), un deuxième perpendiculairement au sens des fibres (90°, traction transversale), puis un troisième à 45° du sens des fibres. Pour cela, les

éprouvettes ont été imprimées avec trois orientations des fibres différentes ;

- 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 et conditionnées dans des environnements différents et/ou contrôlés (ultraviolets, immersion).

Tests de traction suivant l'orientation des fibres

Les tests de traction sont tous réalisés sur une éprouvette normalisée 4. Chaque graphique des contraintes de traction présente également l'intervalle de confiance à deux écarts types, qui regroupe ainsi 95 % des données.

Les réglages d'impression 5 utilisés :

- remplissage : 70 % linéaire ;
- shells : 2 (0,8 mm) ;
- couches : 0,20 mm températures : buse 245 °C (XT-CF20), 220 °C (PLA, ABS, WoodFill) ; plateau 110 °C (ABS), 60 °C (XT-CF20, PLA, WoodFill) ;
- vitesses : extrusion 30 mm/s, déplacement 40 mm/s ;
- sans raft, sans supports ;
- temps : 31 minutes ;
- poids : 6 g (WoodFill) ; 6,5 g (PLA, ABS) ; 7 g (XT-CF20).

Les tableaux 7, 10 et 13 présentent la moyenne de chaque matériau, réalisée sur trois éprouvettes par matériau 6, soit pour chaque type de test (0°, 90° ou 45°) un total de douze essais effectués au laboratoire PIMM (Procédés ingénierie en mécanique et matériaux) aux Arts & Métiers Paris-Tech, en partenariat avec la Start-Up 3D Matter.

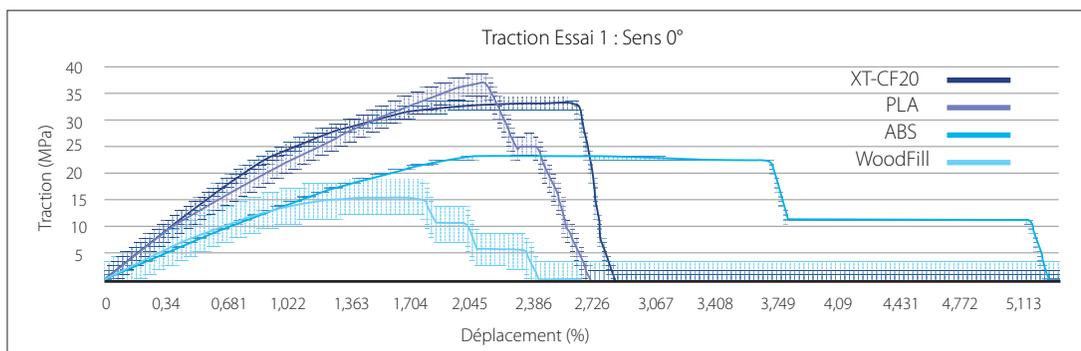
La traction se fait à raison de 0,6 mm/min, avec une valeur toutes les 0,5 seconde.

Le premier test de traction longitudinale 8 montre que le PLA se démarque plutôt bien, suivi par les fibres de carbone (notamment au niveau du module d'Young, où il le dépasse même, malgré une déformation un peu plus importante). L'ABS se trouve quant à lui bien en retrait, avec une déformation bien plus 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.

5. Données constructeur ColorFabb & Wikipedia.

Traction essai 1 : sens 0°	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbone (ColorFabb)	Bois (ColorFabb)
Charge (N)	1 109,020	693,606	997,040	459,956
Charge à limite élastique (N)	221,804	138,721	199,408	91,991
Contrainte de traction (MPa)	36,967	23,120	33,235	15,332
Contrainte de traction (écart type - MPa)	1,047	0,042	0,547	1,698
Contrainte de traction (écart type - %)	2,76	0,18	1,64	11,07
Déformation de traction (déplacement %)	2,254	3,781	2,676	1,870
Déplacement de traction (mm)	2,479	4,159	2,943	2,058
Déplacement de traction (écart type - mm)	0,240	0,941	0,022	0,363
Déplacement de traction (écart type - %)	9,17	18,12	0,63	15,55
Module d'Young (GPa)	3,158	1,643	3,260	2,015
Temps à rupture (s)	247,9	415,9	294,3	205,8
Densité (kg/m ³)	1 210	1 060	1 370	1 240
Coefficient de Poisson	0,36	0,35	?	?
Absorption d'eau (%)	?	0,7	?	?
Coefficient de dilatation thermique ($\times 10^{-6} K^{-1}$)	?	80	?	?

7 Tableau des moyennes obtenues pour les premiers tests (sens 0°) réalisés sur trois éprouvettes de chaque matériau



8 Résultats du premier test de traction (traction longitudinale)



9 Éprouvette carbone après rupture aux tests (traction transversale)

En comparaison, nous avons des contraintes allant de 15 à 37 MPa, ce qui place ces matériaux dans les catégories des résineux courants (C18 à C30), pour la plupart dans les bois lamellés-collés (GL24 à GL32), et même au-dessus pour le PLA. En termes de module d'Young, allant de 1,6 à 3,3 GPa, on se place bien dans la catégorie des polymères (nylon, époxy, polyamide...).

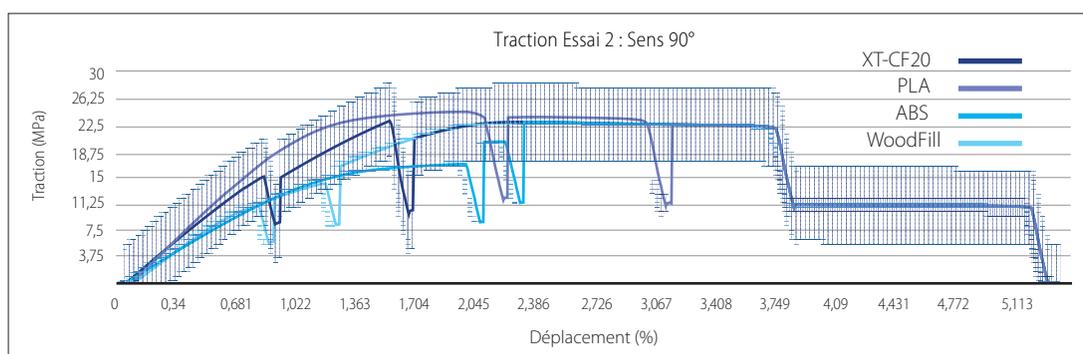
Le deuxième test de traction montre la résistance à l'arrachement des couches; la traction se fait perpendiculairement au sens des fibres.

Les éprouvettes, au lieu d'être imprimées 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 9.

Traction essai 2 : sens 90°	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbone (ColorFabb)	Bois (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 de traction (MPa)	24,584	23,120	23,320	23,120
Contrainte de traction (écart type - MPa)	0,608	0,052	2,678	0,052
Contrainte de traction (écart 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 (écart type - mm)	1,152	1,152	1,152	1,152
Déplacement de traction (écart 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/m ³)	1 210	1 060	1 370	1 240
Coefficient de Poisson	0,36	0,35	?	?
Absorption d'eau (%)	?	0,7	?	?
Coefficient de dilatation thermique ($\times 10^{-6} K^{-1}$)	?	80	?	?

10 Tableau des moyennes obtenues pour les deuxième tests (sens 90°) réalisés sur trois éprouvettes de chaque matériau



11 Résultats du deuxième test de traction (traction transversale)

Le tableau **10** présente la moyenne de chaque matériau, réalisée dans les mêmes conditions que la série précédente.

Le test de traction transversale **11** montre que le PLA se démarque à nouveau, suivi toujours par les fibres de carbone (le module d'Young étant cette fois-ci moins remarquable, mais une déformation nettement moins importante que tous les autres). L'ABS se trouve plus en retrait, avec en plus une déformation bien plus importante avant rupture, tout comme les fibres de bois.

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

Ce deuxième 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

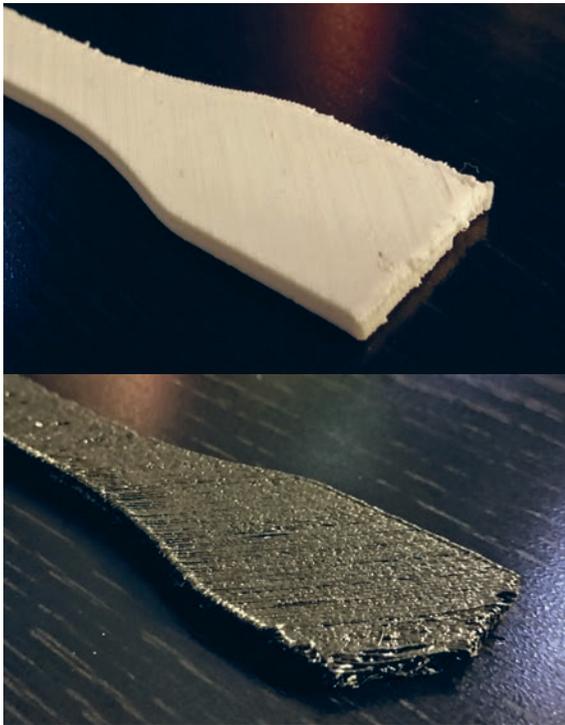
à la traction dans le sens des fibres, à l'exception de l'ABS qui a naturellement une interface entre couches déjà faible, due à sa température de transition vitreuse plus importante.

Le troisième test montre une résistance intermédiaire, la traction se faisant à 45° du sens des fibres.

On remarque que l'impression est beaucoup plus difficile à réaliser sur les pentes à 45° pour les faibles largeurs et/ou épaisseurs. En résulte une plus grande fragilité évidente **12**.

Le tableau **13** présente la moyenne de chaque matériau, réalisée dans les mêmes conditions que les séries précédentes.

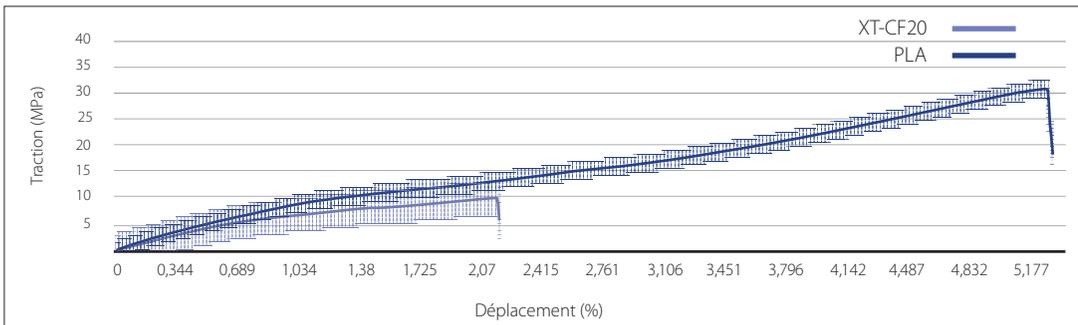
Ce troisième test montre que le PLA travaille donc relativement bien dans la plupart des cas de figure étudiés jusqu'à présent **14**. Avec une traction à 45° de l'orientation des fibres, on se place entre les 35 MPa d'une traction longitudinale et les 25 MPa transverse, avec une moyenne de 30 MPa



12 Éprouvettes PLA (en haut) et fibres de carbone (en bas) après traction à 45°

Traction essai 1 : sens 45°	PLA (MakerBot)	Carbone (ColorFabb)
Charge (N)	948,888	298,750
Charge à limite élastique (N)	185,324	60,010
Contrainte de traction (MPa)	30,887	10,002
Contrainte de traction (écart type - MPa)	0,827	1,612
Contrainte de traction (écart type - %)	2,68	16,12
Déformation de traction (déplacement %)	5,266	2,146
Déplacement de traction (mm)	3,686	1,502
Déplacement de traction (écart type - mm)	0,696	0,587
Déplacement de traction (écart type - %)	18,88	39,07
Module d'Young (GPa)	0,915	0,858
Temps à rupture (s)	221,2	90,5
Densité (kg/m ³)	1 210,0	1 370,0
Coefficient de Poisson	0,36	?
Absorption d'eau (%)	?	?
Coefficient de dilatation thermique (× 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	?	?

13 Tableau des moyennes obtenues pour le troisième test (sens 45°) réalisés sur trois éprouvettes de chaque matériau



14 Résultats du troisième test de traction (traction 45°)

à 45°. La perte est ici de 15 % par rapport à la traction longitudinale, alors qu'elle est de 30 % pour la traction transversale.

Les valeurs des éprouvettes carbone à 45° ne sont malheureusement pas significatives à cause de l'état de surface après impression. Le modèle physique étant beaucoup trop altéré, comme nous voyons sur la photo 12 (difficulté d'impression dans cette orientation), pour prendre ces résultats en compte. On suppose que si la qualité de l'éprouvette était similaire à celle du PLA, les valeurs seraient avoisinantes, comme dans les cas précédents.

Test de fluage

Le test de fluage est réalisé directement sur le filament de matière, avec une longueur initiale de deux mètres environ, pour 1,75 mm de diamètre. Chaque filament est lesté avec un poids de 1,5 kg, soit au tiers de sa charge à rupture (4,5 kg) 15. Les longueurs des



filaments sont ensuite mesurées et relevées à intervalle de temps réguliers (environ toutes les deux semaines, en fin de journée) 16.

On détermine la section du filament :

$$S = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{\pi \times 1,75^2}{4} = 2,4 \text{ mm}^2$$

Puis la contrainte appliquée :

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{15}{2,4} = 6,25 \text{ MPa}$$

Et enfin l'allongement du filament :

$$\varepsilon = \frac{l(t) - l(0)}{l(0)}$$

15 Test de fluage, filaments suspendus

Date M/J/A	Jours	PLA		ABS		Carbone		Bois		Contrainte en MPa
		Allongement relatif en $\mu\text{m}/\text{m}$	Allongement relatif/Contrainte en $[\mu\text{m}/\text{m}]/\text{Mpa}$							
04/23/2015	0	0		0		0		0		0
04/23/2015	0	Accrochage de la charge								
04/23/2015	0	467,50	74,80	1494,76	239,16	450,65	72,10	1347,10	215,53	6,25
04/25/2015	2	467,50	74,80	1494,76	239,16	450,65	72,10	1796,13	287,38	6,25
05/08/2015	15	467,50	74,80	1494,76	239,16	450,65	72,10	2245,17	359,22	6,25
05/16/2015	23	467,50	74,80	1494,76	239,16	450,65	72,10	3592,27	574,76	6,25
05/24/2015	31	935,01	149,60	1494,76	239,16	450,65	72,10	5837,44	933,99	6,25
06/07/2015	45	935,01	149,60	1494,76	239,16	901,30	144,20	19308,48	3089,35	6,25
06/15/2015	53	1402,52	224,40	1494,76	239,16	901,30	144,20	24247,86	3879,65	6,25
06/26/2015	64	1402,52	224,40	1494,76	239,16	1351,96	216,31	27840,14	4454,42	6,25
07/09/2015	77	1402,52	224,40	1494,76	239,16	1802,61	288,41	43107,31	6897,17	6,25
07/18/2015	86	2337,54	374,00	1993,02	318,88	2253,26	360,52	55680,28	8908,84	6,25
07/27/2015	95	3272,55	523,60	1993,02	318,88	2703,92	432,62	56578,35	9052,53	6,25
08/08/2015	107	3272,55	523,60	1993,02	318,88	2703,92	432,62	57925,46	9268,07	6,25
08/16/2015	115	3272,55	523,60	1993,02	318,88	3154,57	504,73	59721,59	9555,45	6,25
08/22/2015	121	3740,06	598,41	1993,02	318,88	3154,57	504,73	61068,70	9770,99	6,25
09/08/2015	138	4207,57	673,21	1993,02	318,88	3605,22	576,83	64211,94	10273,91	6,25
09/17/2015	145	4207,57	673,21	1993,02	318,88	3605,22	576,83	65110,01	10417,60	6,25
09/26/2015	154	4207,57	673,21	2491,28	398,60	3605,22	576,83	67355,18	10776,83	6,25
10/06/2015	164	4675,08	748,01	2491,28	398,60	3605,22	576,83	69151,32	11064,21	6,25
10/17/2015	175	4675,08	748,01	1993,02	318,88	3605,22	576,83	67355,18	10776,83	6,25
10/25/2015	183	4675,08	748,01	1993,02	318,88	3605,22	576,83	67355,18	10776,83	6,25
11/07/2015	196	4675,08	748,01	1993,02	318,88	3605,22	576,83	65559,04	10489,44	6,25
11/17/2015	206	4207,57	673,21	1993,02	318,88	3605,22	576,83	65559,04	10489,44	6,25
11/17/2015	206	Décrochage de la charge								
11/17/2015	206	1402,52		0		3154,57		62415,80		0
11/26/2015	215	935,01		0		2703,92		61068,70		0
12/05/2015	224	935,01		0		2253,26		60619,66		0

16 Relevés du test de fluage

Les mesures de ce test [17](#) [18](#) montrent certaines évolutions.

Le PLA semble s'allonger de manière minime (1 cm en 6 mois), tandis que les fibres de carbone ont l'air de jouer leur rôle (similaire au PLA), contrairement aux fibres de bois qui se sont étirées de plusieurs centimètres (13,5 cm). Et, plutôt surprenant, l'ABS est resté quant à lui parfaitement stable en s'allongeant de seulement 4 mm.

On peut en déduire qu'à l'exception des fibres de bois les autres filaments ne fluent pas; ce caractère est donc négligeable.

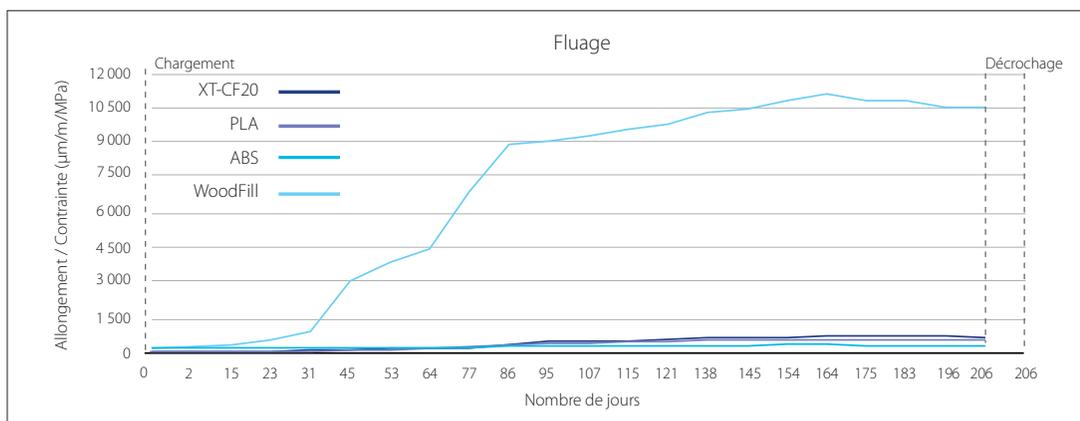
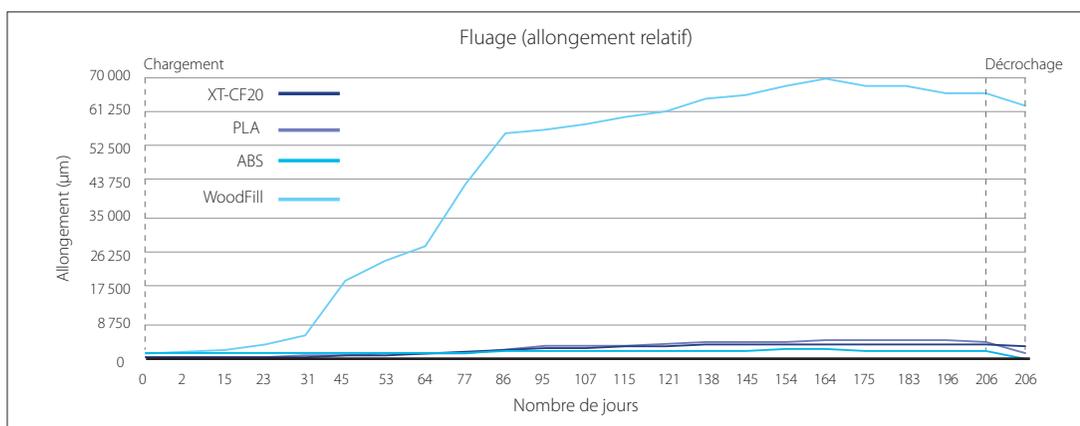
Tests de durabilité

Une autre série de tests a été menée pour évaluer la résistance de ces matériaux à deux facteurs importants : les ultraviolets et l'humidité. Pour ce faire, des éprouvettes identiques à celles utilisées pour les tests de traction sont conditionnées dans des environnements propices à ces expositions.

Le premier critère, la lumière ultraviolette et l'exposition au soleil, est simplement effectué en plaçant les éprouvettes à l'extérieur, tout en limitant leur contact à l'eau (éprouvettes suspendues et abritées) [19](#).

Date	Jours	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbone (ColorFabb)	Bois (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	3 740,07	498,26	3 154,57	64 211,94	Déformation de fluage ($\Delta T \mu\text{m}$)
17/11/2015	206	Décrochage de la charge				
17/11/2015	206	2 805,05	1 993,02	450,65	3 143,24	Retour élastique ($\Delta T \mu\text{m}$)
05/12/2015	224	-467,51	0,00	-901,31	-1 796,14	Retour de fluage ($\Delta T \mu\text{m}$)
05/12/2015	224	935,02	0,00	2 253,27	60 619,67	Déformation permanente ($\Delta T \mu\text{m}$)

17 Déformations instantanées et différées



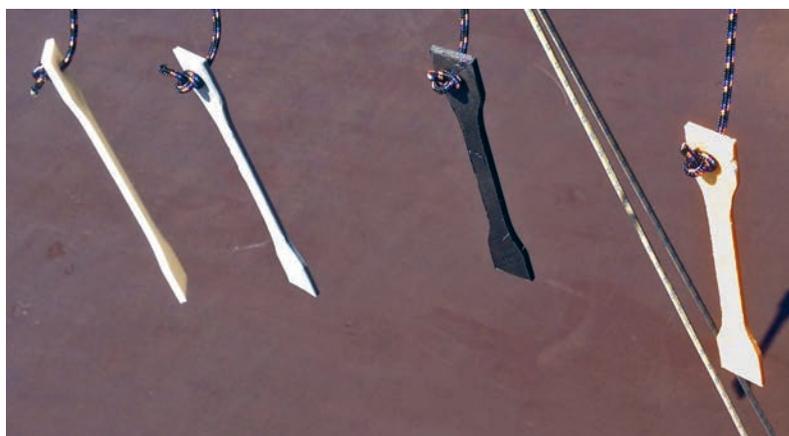
18 Courbes de fluage

Les mesures sont effectuées en pesant les éprouvettes régulièrement, afin de vérifier une éventuelle prise ou perte de poids signifiant une altération ou non, puis sont soumises au même test de traction que les premiers essais.

Les valeurs relevées de ce test 20 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 21.

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).



19 Éprouvettes exposées aux ultraviolets

Le deuxième critère évalué est celui de l'humidité. Pour cela, une série est placée en immersion totale dans l'eau.

De même que pour les ultraviolets, les éprouvettes sont pesées pour suivre d'éventuelles altérations [22](#).

Les éprouvettes immergées sont soumises à des tests de traction dans la continuité de ceux effectués auparavant [23](#).

On remarque que la contrainte à rupture a diminué de près de 16 % pour le PLA, de 33 % pour le carbone et le bois, et l'ABS de 8 % par rapport au test de traction longitudinale.

Ces résultats montrent une grande sensibilité à l'eau, donc une grande porosité pour les fibres de bois et de carbone.

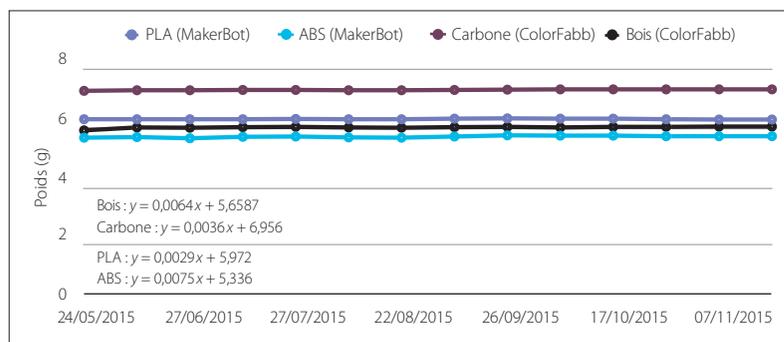
Conclusion

Les matériaux retenus sont indiqués dans le tableau [24](#). Après les tests [25](#), 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 coût raisonnable (60 \$/kg), tandis que le filament PLA semble convenir si l'on compte opérer un post-traitement sur la pièce ou l'utiliser en environnement sec.

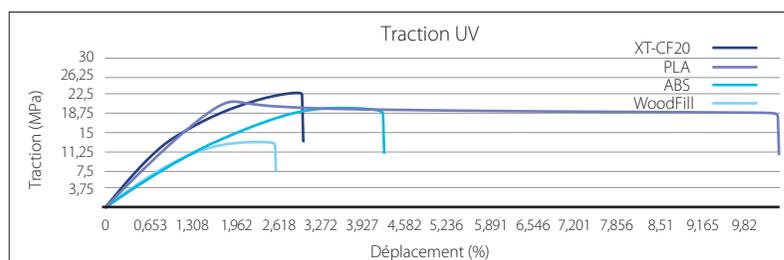
Le filament de fibres de bois aurait pu être intéressant à exploiter, mais ses résistances sont bien en dessous des deux autres; il reste peut-être intéressant malgré tout dans le cas d'impressions bimatériaux, afin d'avoir juste une couche de finition extérieure en fibres de bois, simplement pour donner un aspect bois esthétique, l'intérieur structural de la pièce étant en PLA ou en fibres de carbone. ■

Date	Poids (g)			
	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbone (ColorFabb)	Bois (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



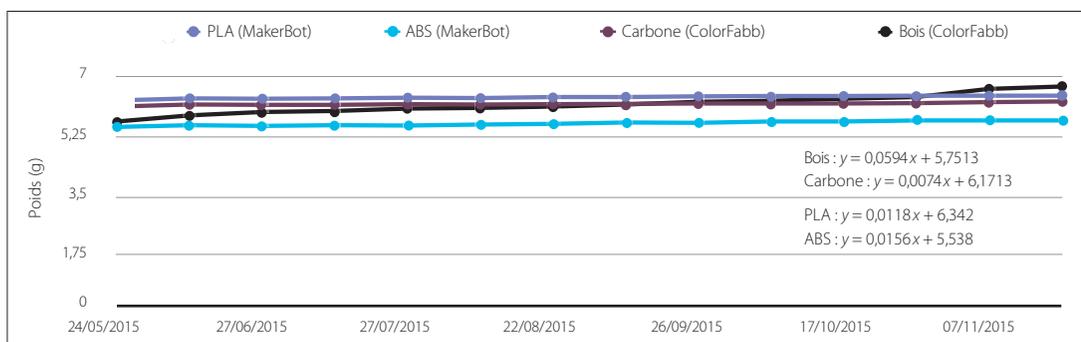
20 Relevés du test d'exposition aux ultraviolets

Traction UV	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbone (ColorFabb)	Bois (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 de traction (MPa)	21,206	19,932	22,944	13,153
Déformation de traction (dépl. %)	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/m ³)	1 210	1 060	1 370	1 240
Coefficient de Poisson	0,36	0,35	?	?
Absorption d'eau (%)	?	0,7	?	?
Coefficient de dilatation thermique (x 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	?	80	?	?



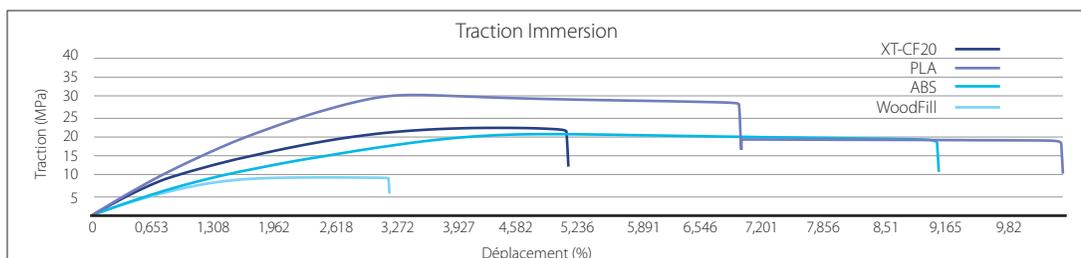
21 Relevés du test de traction des éprouvettes exposées aux ultraviolets

Date	Poids (g)			
	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbone (ColorFabb)	Bois (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



22 Relevés du test d'immersion

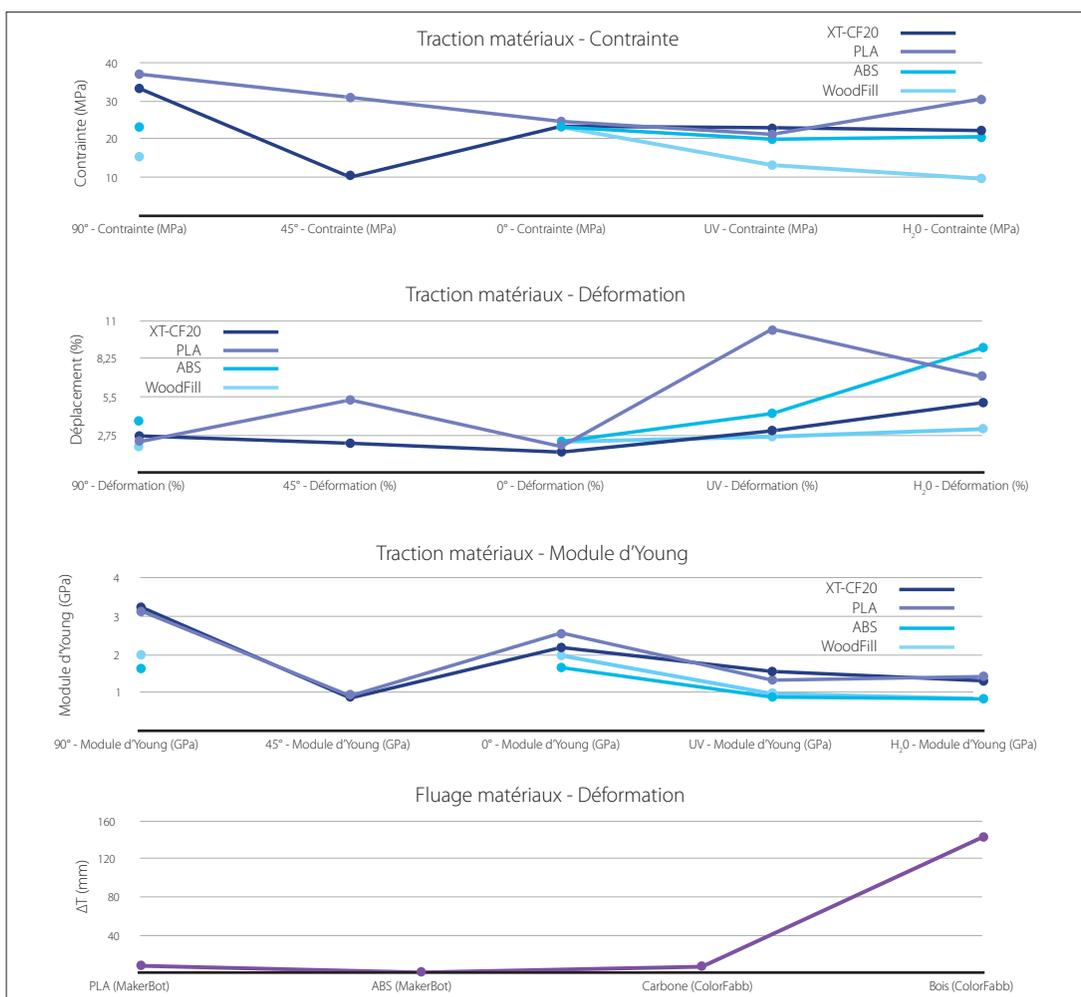
Traction Immersion	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbone (ColorFabb)	Bois (ColorFabb)
Charge (N)	937,925	692,100	752,937	315,501
Charge à limite élastique (N)	183,427	123,589	133,185	57,433
Contrainte de traction (MPa)	30,571	20,598	22,197	9,572
Déformation de traction (dépl. %)	6,918	9,039	5,073	3,168
Déplacement de traction (mm)	4,843	6,327	3,551	2,218
Module d'Young (GPa)	1,420	0,835	1,310	0,838
Temps à rupture (s)	144,6	205,7	184,2	103,2
Densité (kg/m ³)	1 210	1 060	1 370	1 240
Coefficient de Poisson	0,36	0,35	?	?
Absorption d'eau (%)	?	0,7	?	?
Coefficient de dilatation thermique ($\times 10^{-6} K^{-1}$)	?	80	?	?



23 Relevés du test de traction des éprouvettes immergées

Conclusion (valeurs absolues)	PLA (MakerBot)	ABS (MakerBot)	Carbone (ColorFabb)	Bois (ColorFabb)
90° - Contrainte (MPa)	36,967	23,120	33,235	15,332
45° - Contrainte (MPa)	30,887		10,002	
0° - Contrainte (MPa)	24,584	23,120	23,320	23,120
UV - Contrainte (MPa)	21,206	19,932	22,944	13,153
H ₂ O - Contrainte (MPa)	30,571	20,598	22,197	9,572
90° - Déformation (%)	2,254	3,781	2,676	1,870
45° - Déformation (%)	5,266		2,146	
0° - Déformation (%)	1,908	2,272	1,508	2,249
UV - Déformation (%)	10,367	4,284	3,037	2,622
H ₂ O - Déformation (%)	6,918	9,039	5,073	3,168
90° - Module d'Young (GPa)	3,158	1,643	3,260	2,015
45° - Module d'Young (GPa)	0,915		0,858	
0° - Module d'Young (GPa)	2,563	1,656	2,182	1,969
UV - Module d'Young (GPa)	1,326	0,883	1,554	0,969
H ₂ O - Module d'Young (GPa)	1,420	0,835	1,310	0,838
Fluage - T (mm)	8,0	1,0	7,0	143,0

24 Comparaison des résultats aux tests



25 Résumé des performances des matériaux testés