

Impression de matériaux composites

JIMMY NASR*, PHILIPPE TAILLARD**

Avec l'impression 3D, le projeteur peut directement depuis la CAO produire les pièces prototypes en thermoplastique. Dorénavant, l'utilisation de matériaux composites lui permet d'atteindre des performances mécaniques supérieures aux métaux les plus nobles.

L'impression 3D a fait beaucoup parler d'elle ces dernières années, souvent présentée comme un moyen de réaliser toutes sortes de pièces mécaniques esthétiques. L'impression 3D n'est pas une technologie unique. Il existe une multitude de procédés permettant d'imprimer un objet selon trois grands principes : le dépôt de matière, la solidification de matière par la lumière et l'agglomération de matière par collage.

Les utilisateurs ayant adopté ce moyen de réalisation en connaissent bien les limites : la question des performances mécaniques, de la précision, de la mise au point de la fabrication, sans compter l'expérience qu'il aura fallu acquérir pour réussir des pièces bonnes du premier coup, pièces qui généralement font office de prototype semi-fonctionnel.

Nouvelle technologie

L'arrivée de l'imprimante 3D Mark-Two **1** (voir encadré) est de ce point de vue une rupture technologique. En effet, l'utilisateur peut désormais fabriquer des pièces finales. On peut parler alors de production additive et non de prototypage rapide. Le procédé que l'on va présenter ici va plus loin puisqu'il permet de réaliser des pièces en bi-matière.

Cette nouvelle machine est une évolution de la première génération Mark-One. À la fois plus rapide et offrant un choix plus vaste de matériaux, la Mark-Two permet également des renforts dans des géométries plus complexes.

Le procédé unique développé par Markforged permet la réalisation de modèles en bi-matière. Le matériau de base est un nylon (polyamide souple, PA 6-6) déposé en « nid d'abeille » suivant le principe FDM (*Fused Deposition Modeling*), permettant d'importants gains de poids. On rappelle que la

MOTS-CLÉS

créativité, machine, procédé, prototypage, production

technologie FDM, inventée par Stratasys il y a plus de 20 ans, fabrique les pièces couche après couche, de bas en haut, en chauffant et en extrudant un filament thermoplastique, ici le nylon. On parle aussi de FFF (*Fused Filament Fabrication* ou fabrication de fil fondu) qui est un terme libre de droits.

Mais la révolution ne s'arrête pas là. En effet, la Mark-Two permet l'adjonction de fibres longues de verre, de carbone ou même de kevlar, offrant une tenue en flexion largement supérieure aux alliages légers et même à l'acier. Ce renfort est réalisé avec une fibre continue, ce qui confère au modèle fabriqué des propriétés mécaniques exceptionnelles!

La Mark-Two utilise une technologie brevetée appelée *Composite Filament Fabrication* (CFF) ou « fabrication continue de filaments composites » pour renforcer les pièces 3D imprimées en nylon ou onyx, avec ajout automatique et optimisé de brin continu de fibre de carbone, kevlar, fibre de verre et fibre de verre haute température.

En utilisant un système double tête d'extrusion avec d'une part la technologie CFF **2** et d'autre part la technologie FFF, la Mark-Two peut créer des pièces étonnamment robustes en tirant parti des propriétés des matériaux composites.

Avec le premier extrudeur, le remplissage de la matière première (nylon ou onyx) peut se faire de trois manières différentes **3a** : linéaire, triangulaire ou hexagonale (nid d'abeille).

Avec le deuxième extrudeur, la fibre est déposée sur les couches suivant deux types de trajectoires **3b** pour renforcer les parties mécaniques.

Toutes les combinaisons sont possibles entre les trois modes de dépôt de matière première et les deux modes de dépôt de la fibre. La machine permet aussi de déposer de la fibre sur des petites surfaces aux lieux des concentrations de contraintes de la pièce dans son fonctionnement normal.

Cette technologie est l'outil idéal pour les applications telles que la fabrication de :

- gabarits, fixations et autres outillages;
- des pièces de production spécifiques;
- des prototypes fonctionnels **4**;
- des pièces structurelles.

Les pièces sorties de la Mark-Two, en version nylon/carbone par exemple, offrent un module de

* Technicien de la société 3D Avenir.
** Rédacteur en chef de *Technologie*.

3D Avenir, distributeur de l'imprimante

Les machines Markforged sont commercialisées par 3D Avenir, qui propose depuis près de 10 ans une sélection d'équipements 3D, logiciels, scanners et imprimantes. Forte d'une expérience reconnue, la société complète son offre avec des produits innovants tels que l'imprimante Mark-Two.

flexion quasi identique à celui de l'aluminium 6061-T6 **5**, mais un rapport résistance/poids plus élevé **6**.

L'imprimante Mark-Two dans sa version « Entreprise » offre la possibilité d'utiliser de la fibre de verre haute température ainsi qu'une variété de matériaux étendue, dont l'onyx, un matériau composite chargé de microfibres de carbone. À l'image de son homonyme minéral, l'onyx offre des propriétés mécaniques jusque-là impensables. Il limite totalement le rétreint de la matière au refroidissement, il offre une excellente tenue de la pièce sur le plateau de l'imprimante, ce qui permet de construire des pièces sans même besoin de matière support.

Méthodologie de conception

La fibre renfort sera choisie en fonction des propriétés recherchées **7**.

La fibre de verre, rentabilité et légèreté

Parmi les matériaux composites les plus utilisés, la fibre de verre a de bonnes résistances mécaniques associées à une bonne stabilité dimensionnelle. C'est un bon isolant électrique qui a aussi une faible conductibilité thermique. Ces caractéristiques lui confèrent une bonne résistance aux agents chimiques. Elle est tout à fait adaptée à la fabrication d'objets courants et durables.

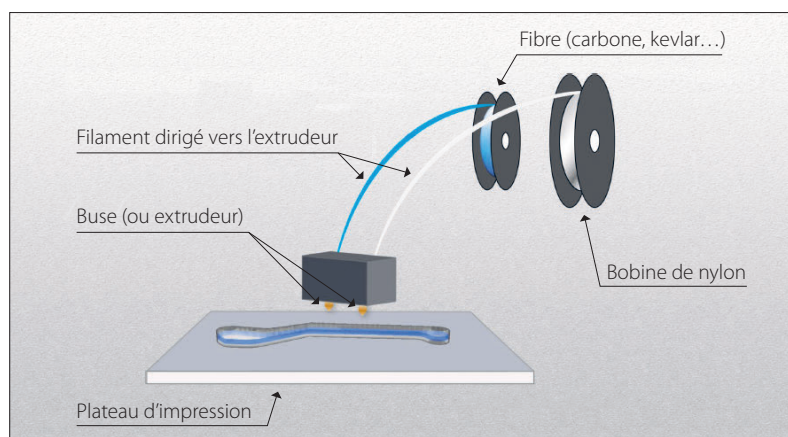
La fibre de verre haute température autorise une température de fléchissement sous charge jusqu'à 140 °C.

La fibre de carbone, l'alliée solidité

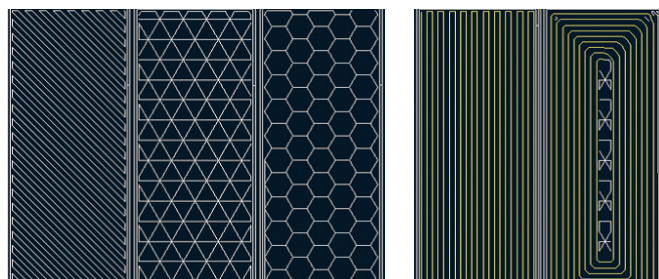
La fibre de carbone allie des caractéristiques mécaniques élevées en traction et en compression, et légèreté. Ayant une bonne conductibilité thermique et électrique, elle possède également une très bonne tenue en température et en fatigue; ce renfort est parfait pour les applications nécessitant une très grande solidité.



1 Imprimante Markforged Mark-Two



2 Technologie CFF



3a Différents dépôts du thermoplastique : linéaire, triangulaire ou nid d'abeille

3b Différentes trajectoires de dépôt de fibre continue : isotropique et concentrique

Le kevlar, l'infatigable

De la famille des fibres d'aramide, le kevlar est le matériau composite qui résiste le mieux à l'abrasion. Cette fibre auto-extinguible possède de bonnes propriétés mécaniques en traction et en fatigue. C'est aussi un excellent isolant électrique. Il est l'allié parfait pour



4 Sous-ensemble mécanique fonctionnel

la fabrication de pièces qui doivent supporter des vibrations et résister à la fatigue.

Plusieurs paramètres, comme le sens d'orientation, le type de remplissage et la densité de la pièce vont jouer sur la résistance finale de la pièce.

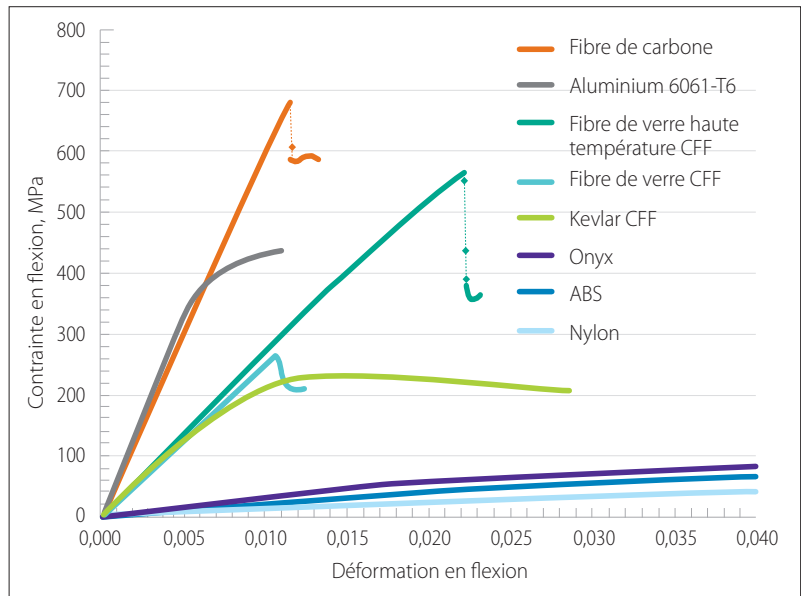
À partir d'une simulation 3D des efforts appliqués à la pièce ainsi que la connaissance du milieu d'utilisation (température, hygrométrie...), l'utilisateur peut cibler le choix de fibre, puis la disposer en fonction des zones où les contraintes sont les plus élevées 8.

L'utilisateur devra toutefois, concevoir ou reconcevoir (rétro-engineering) son modèle pour cette technologie d'impression 3D composite afin d'optimiser les géométries. Le logiciel propriétaire Eiger (voir encadré) génère automatiquement les supports qui seront imprimés en nylon.

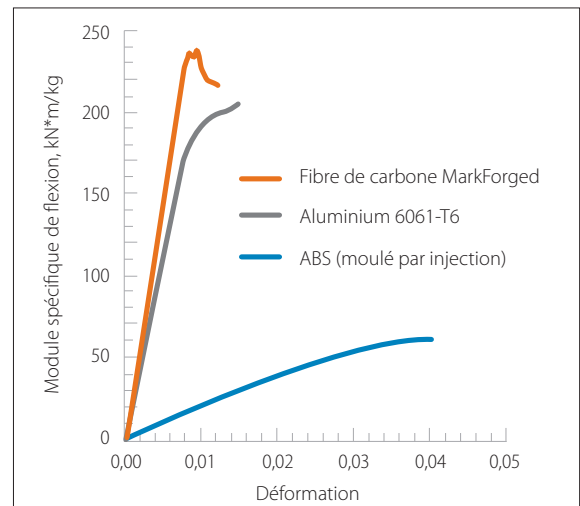
En conclusion

Avec cette nouvelle technologie, les ingénieurs et les techniciens peuvent concevoir des pièces en fonction de leur besoin avec des contraintes de conception qui sont repoussées. Ils obtiennent des pièces fonctionnelles et définitives directement de leur poste de CAO dans la même journée, sans demande de prix et sans approvisionnement matière comme jadis en usinage.

Les coûts sont bas, les délais à J + 1 sont très rapides, il n'y a pas de post-traitement à prévoir et surtout une très grande liberté dans la conception pour des pièces optimisées du point de vue de leurs performances mécaniques par rapport à leur poids. ■



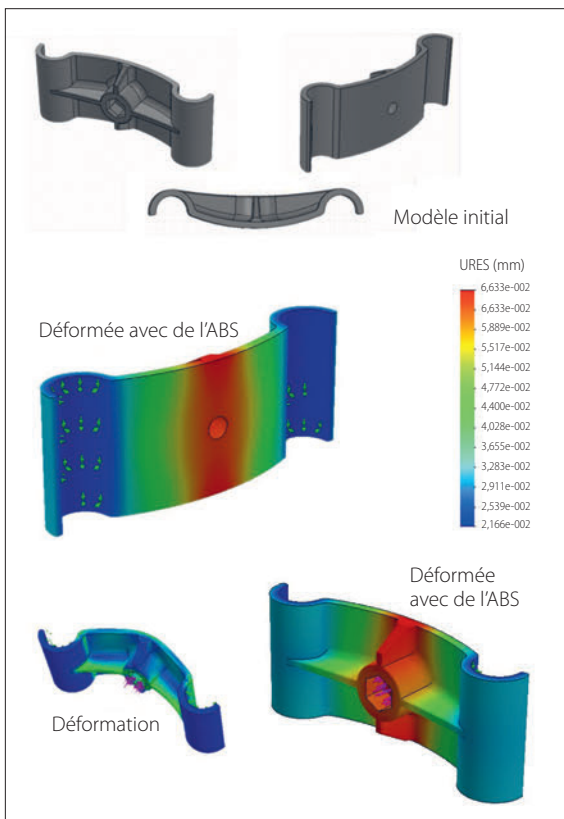
5 Comparaison du module de flexion de chaque composite avec l'ABS ou le nylon



6 Comparaison du module spécifique de flexion (ou indice de performance E/p)

Propriété	Nylon	Fibre de carbone CFF	Kevlar CFF	Fibre de verre CFF
Résistance à la traction (MPa)	53,8	700	610	590
Module d'élasticité en traction (GPa)	0,94	50	26	20
Déformation à la rupture en traction (%)	260	1,5	5,5	5,5
Résistance à la flexion (MPa)	32	470	190	210
Module d'élasticité en flexion (GPa)	0,84	48	24	21
Déformation à la rupture en flexion (%)	N/A	12	2,1	2,1
Résistance à la compression (MPa)	N/A	320	97	140
Module d'élasticité en compression (GPa)	N/A	50	26	20
Déformation à la rupture en compression (%)	N/A	0,7	1,5	0,7
Résistance à la déformation à chaud (°C)	44-50	105	105	105

7 Propriétés mécaniques du nylon et de fibres composites



Eiger, un logiciel pour l'impression 3D

Chaque imprimante 3D Mark est livrée avec Eiger, un logiciel spécialement développé pour l'impression 3D. Compatible avec tous les ordinateurs, Eiger est facile à utiliser et intuitif pour une impression optimisée.

En fonction de vos projets, le logiciel renforce automatiquement les parties sensibles avec de la fibre pour optimiser la résistance et la rigidité. L'impression 3D se déroule avec une précision de 100 µm, avec la possibilité de suspendre l'impression, d'ajouter des inserts et de reprendre l'impression dans la position initiale.



■ Pièces avec inserts métalliques

8 Projet exécuté par Richard Allard, professeur agrégé en microtechnique au lycée Pablo-Neruda de Dieppe (76)

Autre nouveauté technologique : une imprimante 3D papier et couleur

Le fabricant Irlandais M'COR, inventeur de la technologie SDL (Selective Deposition Laminated) a été honoré lors du dernier Consumer Electronic Show de Las Vegas par l'attribution du prix de la meilleure innovation 2016 dans la catégorie produit d'impression 3D, pour sa nouvelle imprimante 3D Couleur, Arke.

La machine se distingue par sa capacité à fabriquer des modèles en couleur haute définition avec du papier comme matériau de construction des modèles.

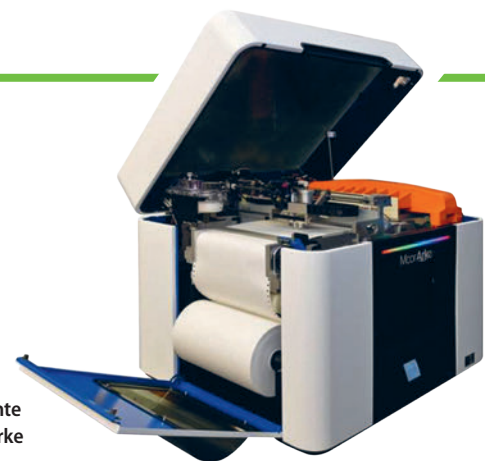
Le principe consiste à venir détourner une section de papier sur laquelle est projetée de l'encre, puis de la colle. Cette section est déposée sur un plateau, puis le rouleau de papier avance d'un pas et une nouvelle section est alors à son tour découpée, imprimée, puis collée, pressée sur la section précédente.

Ce procédé renouvelé plusieurs fois permet de réaliser des volumes avec une précision de 1/10^e et surtout avec une qualité de couleur extraordinaire. Le dépôt de la couleur est réalisé en technologie jet d'encre, fonctionnant sur le principe de quadrichromie cyan, magenta, jaune et noir et offrant une palette de 16 millions de couleurs.

Toutes les parties de volume non utile sont prédécoupées en petits cubes qu'il suffira d'ôter après l'impression. Ce sera le seul post-traitement requis.

Des modèles à la fois légers et solides avec des couleurs photo-réalistes, très intéressants pour des applications pédagogiques, médicales, pour des modèles de design ou bien encore des modèles d'architecture et pour les marchés d'art et patrimoine.

L'aspect économique a été travaillé finement et si l'équipement est proposé à un prix très attractif, environ 20 k€, son coût opérationnel est un argument supplémentaire très intéressant. Le prix de revient est annoncé à 0,10 € par cm³.



■ Imprimante 3D couleur Arke



■ Exemples de réalisation