

# additive

FABRICATION

FABRICATION

# additive

## 3D ADEPT **MAG**



## IMPRESSION **3D**

**LA FABRICATION ADDITIVE ET LA FONDERIE :  
COMMENT LA FA RÉVOLUTIONNE-T-ELLE LE MOULAGE DES MÉTAUX ?**

N°4 - Vol 5 / Juillet - août 2022

Édité par 3D ADEPT MEDIA - ISSN : 2736-6634



mesago

formnext

15 – 18 NOVEMBER 2022  
FRANKFURT / GERMANY

## Make the impossible possible!

We know that Additive Manufacturing offers undreamed-of potential. In addition to the printer, however you also need the upstream and downstream processes plus the experts, who have mastered the technology. You'll only find all this at Formnext!

[formnext.com](http://formnext.com)

**Where ideas take shape.**

PARTNER COUNTRY  
FRANCE



Edité par **3D ADEPT MEDIA**

### **Création graphique**

Martial Y. , Charles Ernest K.

### **Rédaction**

Kety S., Yosra K.

### **Correction**

Jeanne Geraldine N.N.

### **Publicité**

Laura Depret

Laura.d@3dadept.com

### **Périodicité & Accessibilité :**

3D ADEPT Mag est publié tous les deux mois sous forme de publication numérique gratuite ou d'abonnement imprimé.

### **Exactitude du contenu**

Même si nous investissons des efforts supplémentaires et continus pour garantir l'exactitude des informations contenues dans cette publication, l'éditeur décline toute responsabilité en cas d'erreurs ou d'omissions ou pour toute conséquence en découlant. 3DA Solutions décline toute responsabilité pour les opinions ou les affirmations exprimées par les contributeurs ou les annonceurs, qui ne sont pas nécessairement celles de l'éditeur.

### **Publicités**

Toutes les publicités et publications sponsorisées commercialement, en ligne ou imprimées, sont indépendantes des décisions éditoriales. 3D ADEPT Media ne cautionne aucun produit ou service marqué comme une publicité ou promu par un sponsor dans ses publications.

### **Responsabilité de l'éditeur**

L'éditeur n'est pas responsable de l'impossibilité d'imprimer, de publier ou de diffuser tout ou partie d'un numéro dans lequel figure une publicité acceptée par l'éditeur si cette impossibilité est due à un cas de force majeure, à une grève ou à d'autres circonstances indépendantes de la volonté de l'éditeur.

### **Reproduction**

Toute reproduction totale ou partielle des articles et iconographies publiés dans 3D Adept Mag sans l'accord écrit de la société éditrice est interdite. Tous droits réservés.



### **Questions et feedback:**

3D ADEPT SPRL (3DA)

VAT: BE0681.599.796

Belgium -Rue Borrens 51 - 1050 Brussels

Phone: +32 (0)4 86 74 58 87

Email: contact@3dadept.com

Online: www.3dadept.com

## **Sommaire**

---

**Editorial** .....04

---

**Dossier**.....07

---

**LA FABRICATION ADDITIVE ET LA FONDERIE : COMMENT LA FA RÉVOLUTIONNE-T-ELLE LE MOULAGE DES MÉTAUX ?**

**Post-traitement** .....15

---

TRAITEMENT THERMIQUE POUR LES PIÈCES FABRIQUÉES DE MANIÈRE ADDITIVE : UN SALE PETIT SECRET QUI RESTE À COMPRENDRE

**Interview du Mois** .....21

---

**CONFLUX TECHNOLOGY** : RÉINVENTER LES ÉCHANGEURS DE CHALEUR À HAUTE PERFORMANCE AVEC LA FABRICATION ADDITIVE D'ABORD, PUIS APPLIQUER CETTE EXPERTISE À D'AUTRES DOMAINES.

**Matériaux** .....25

---

POUDRES MÉTALLIQUES POUR LES APPLICATIONS DE FA DANS L'AÉROSPATIALE

**Logiciels** .....33

---

4 STRATÉGIES LOGICIELLES QUI PEUVENT ÊTRE EXPLORÉES POUR PERMETTRE L'ALLÈGEMENT AVEC LA FABRICATION ADDITIVE.

**AM Shapers Segment** .....37

---

BIENS DE CONSOMMATION : L'IMPRESSION 3D EST AU CŒUR DE LEUR ACTIVITÉ

**OPINIONS | Expérience pratique** .....41

---

FA 101 : LES CONSEILS DE TROIS EXPERTS DU SECTEUR POUR RÉDUIRE LES COÛTS ET LES DÉLAIS DE L'IMPRESSION 3D.

---



# Bonjour & bienvenue



## **Pour les experts et les novices.**

La fabrication additive n'arrête pas d'avancer. Et on avance avec elle. On avance avec les industries verticales qui l'explorent et l'exploitent quotidiennement, saisonnièrement ou ponctuellement. En le faisant, il est facile de se laisser entraîner par la vague des utilisateurs avancés, de ceux qui sont à la recherche de solutions quelques fois improbables à des problèmes toujours plus complexes. C'est l'adrénaline de vouloir démystifier l'inconnu – et quand elle redescend, on se rappelle qu'à côté, il y a les nouveaux utilisateurs. Ceux-là qui commencent leur aventure, qui découvrent, et ne savent pas sur quelle musique danser. Ceux-là viennent aussi de part et d'autre du monde, de diverses industries et de background différents. Ils recherchent des conseils, des astuces, des bons plans et les reçoivent facilement quand ils viennent d'autres utilisateurs comme eux.

Dans ce numéro de 3D ADEPT Mag, on a donné à la parole à ces deux profils d'utilisateurs – A travers diverses rubriques, on est retournés aux basiques de l'impression 3D mais on a aussi parlé de sujets plus complexes, plus techniques. Et le plus drôle ? C'est que je trouve qu'ils cadrent bien avec cette période estivale. Alors, si vous vous sentez d'humeur à parler d'allègement, de chaleur (comprendre « heat treatment » et « heat exchangers »), de poudres, de moulage des métaux en FA ou encore d'applications typiques de l'été, vous êtes certainement au bon endroit.



**Kety SINDZE**

Editrice-en chef chez 3D ADEPT Media

✉ [ketys@3dadept.com](mailto:ketys@3dadept.com)

Editorial



# Significant Cost Savings on Additive Tool

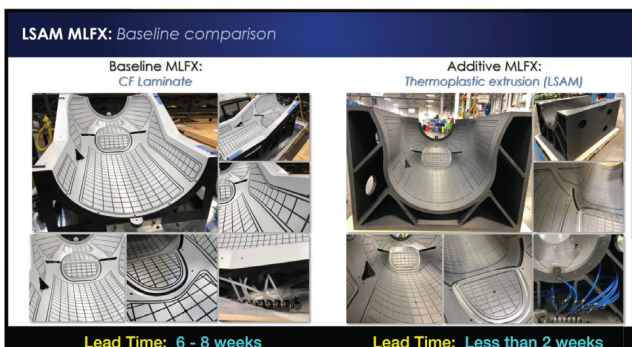
Partnership between Thermwood and General Atomics

## The Details

Using a Thermwood LSAM 1020, the tool was printed from ABS (20% Carbon Fiber Filled) in 16 hours. The final part weighing 1,190 lbs was machined in 32 hours.

**Cost Savings of around \$50,000 vs traditional methods**

Total lead time for the part decreased from 6-8 weeks to less than 2 weeks by utilizing the powerful LSAM system.

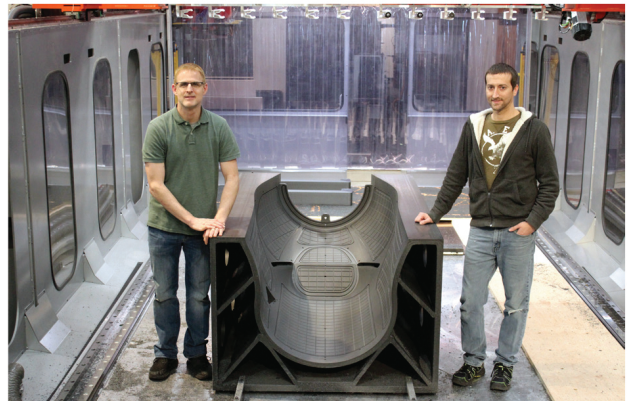


Scan QR code to view a video of the LSAM and General Atomics process.

# THERMWOOD

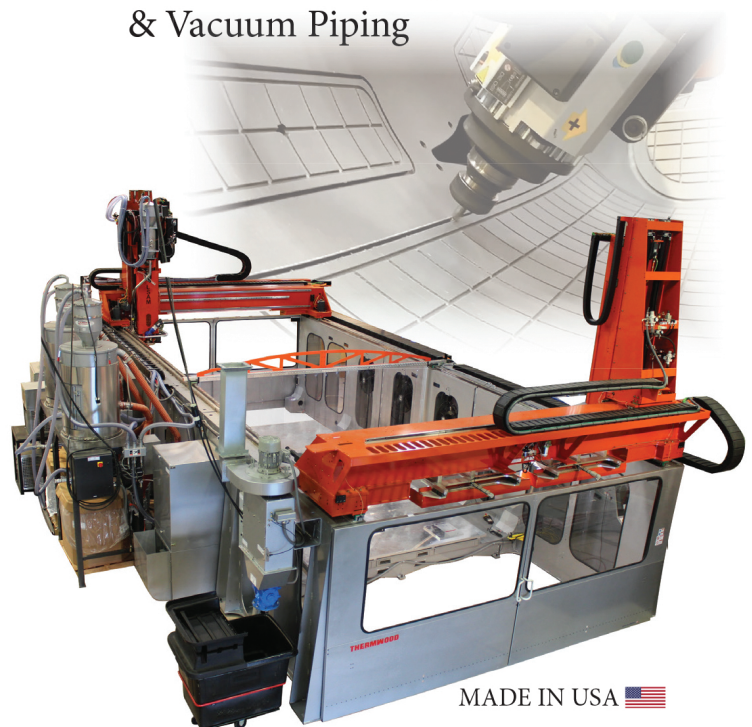
[www.thermwood.com](http://www.thermwood.com)

800-533-6901



## The Results

- Cost Reduction: 2-3 times
- Faster Development: 3-4 times
- Production Capable Tool
- Vacuum Integrity
- Suitable for Large, Deep 3D Geometries, Backup Structures & Vacuum Piping



MADE IN USA

## LA FABRICATION ADDITIVE ET LA FONDERIE : COMMENT LA FA RÉVOLUTIONNE-T-ELLE LE MOULAGE DES MÉTAUX ?

Si on ne regarde que la pièce fabriquée, à première vue, il pourrait être facile de dire que la technologie de coulée n'a rien à envier à l'impression 3D métal, car les deux technologies peuvent fournir des pièces avec des trous internes et une rugosité de surface similaire. Seulement voilà, la rugosité de surface et les trous internes ne suffisent pas à faire pencher la balance en faveur d'une technologie ou d'une autre. Les propriétés mécaniques, la productivité et les coûts sont d'autres éléments qui pourraient aider à déterminer si les deux technologies peuvent être considérées comme des «ennemies» ou des «amies».

Avez-vous déjà réalisé que presque tous les objets qui nous entourent intègrent des pièces de fonderie ? Le portail d'une maison, une clé à molette, un avion, un immeuble de bureaux, un camion, etc. Chacun de ces objets intègre des pièces en métal moulé. Avec un tel nombre d'applications couvertes par la technologie de moulage, et compte tenu des avantages bien connus de la fabrication additive, la logique voudrait que la combinaison de FA-moulage conduise automatiquement à un certain nombre d'applications plus performantes dans un large éventail d'industries, mais les choses ne sont pas toujours aussi simples dans la fabrication.

Il est logique d'explorer comment ces technologies peuvent progresser main dans la main quand on sait que l'industrie de la fonderie représente [un pourcentage important de l'industrie manufacturière](#).

La technologie de moulage est l'une des plus anciennes technologies de production au monde. En fait, le processus de moulage était déjà utilisé en Égypte en 2800 avant Jésus-Christ. Pour ceux qui ne sont pas familiers avec ce processus, il pourrait être intéressant que vous gardiez cette description à l'esprit : généralement utilisé pour créer des formes creuses et complexes, le moulage consiste à verser un matériau liquide dans la cavité d'un moule spécialement conçu (la cavité faisant référence à la forme du produit à fabriquer). Une fois le matériau liquide refroidi, il se solidifie en une pièce appelée pièce moulée.

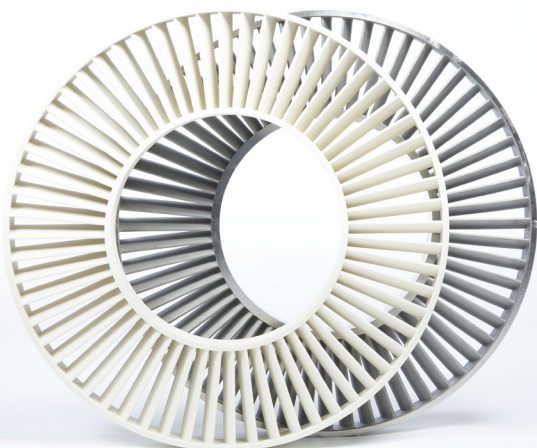
Les fabricants étant de plus en plus à la recherche de solutions susceptibles d'offrir les conditions les plus favorables en termes de prix, de temps et de qualité, comment ne pas imaginer que la fabrication additive, l'une des technologies de fabrication les plus récentes, puisse avoir son rôle à jouer dans un processus de fabrication impliquant un moulage ?

Ce dossier a pour ambition d'explorer les différentes voies où la FA & et le moulage peuvent être considérés comme des processus complémentaires, par opposition à celles où ils peuvent être considérés comme des processus concurrents. Pour ce faire, ce dossier exclusif abordera les points suivants :

- Les différents procédés de moulage existants, en mettant l'accent sur ceux qui correspondent le mieux à la FA ;
- Les points de vue des logiciels et des matériaux pour les approches de fabrication hybrides qui impliquent la FA et le moulage ;
- Les différentes attentes en termes de productivité et de coûts qui peuvent être suscitées.







## Types de procédés de coulée

Trois procédés différents viennent immédiatement à l'esprit lorsqu'on parle de moulage : le **moulage sous pression**, le **moulage à la cire perdue** et le **moulage en sable**. En réalité, les recherches montrent qu'on peut [avoir jusqu'à 13 types différents de procédés de moulage](#). En plus des trois procédés mentionnés ci-dessus, les autres méthodes de moulage comprennent : Le moulage en coquille, le moulage en plâtre, le moulage en céramique, le moulage sous vide, le moulage en moule permanent, le moulage en boue, le moulage sous pression, le moulage centrifuge, le moulage en continu et le moulage sous pression.

Il est intéressant de noter que « les principaux procédés de moulage combinés à la FA sont le moulage en sable et le moulage à la cire perdue. Ces deux procédés de moulage peuvent être traités par Binder Jetting (technologie de jet de liant). Soit pour imprimer des moules et des noyaux en sable directement et sans outils, soit en imprimant du plastique PMMA pour créer des modèles pour les applications de moulage à la cire perdue. En combinant le moulage en sable ou à la cire perdue avec la FA, les coûts et les délais de livraison, en particulier pour les prototypes et les petits volumes ou les grands composants individuels, peuvent être réduits jusqu'à 75 % grâce à l'absence d'outils », déclare d'emblée **Christian Traeger**, directeur des ventes et du marketing chez voxeljet.

La méthode de moulage en sable consiste à produire des pièces moulées dans un moule en sable, en acier, en fer et dans la plupart des alliages non ferreux. Elle implique plusieurs étapes afin d'obtenir une finition de haute qualité. Toutefois, quelques-uns de ses avantages et inconvénients peuvent être résumés comme suit :

Avantages	Inconvénients
Coûts de production peu élevés, notamment pour les petites séries.	Le processus donne un degré de précision inférieur à celui des autres méthodes en raison du rétrécissement.
Possibilité de fabriquer des pièces de grande taille.	Il peut être difficile de sabler des pièces moulées avec des spécifications de taille et de poids prédéterminées.
Capacité à couler des matériaux ferreux et non ferreux.	De mauvaises finitions de surface peuvent se produire.



La méthode bien connue du moulage à la cire perdue, quant à elle, commence dans la salle de cire et se termine par des essais où les pièces moulées sont soigneusement ébarbées, sablées et traitées thermiquement. Traditionnellement, ce procédé nécessite la création d'un moule dans lequel un alliage fondu peut être versé : un modèle en cire est recouvert d'un matériau céramique réfractaire ; à mesure que le matériau réfractaire durcit, sa géométrie interne prend la forme du modèle en cire ; au cours de la troisième étape, la cire est fondue et le métal fondu est versé dans la cavité du moule. Ce métal fondu se solidifie ensuite et le matériau céramique extérieur est brisé pour faire sortir la pièce moulée.

Comme nous l'avons résumé ci-dessus avec le procédé de moulage en sable, voici quelques avantages et inconvénients de ce procédé :

Avantages	Inconvénients
Peut réaliser le moulage de pièces très complexes et extrêmement précises avec un bon état de surface dès le démoulage ;	Idéal pour les pièces de petite taille.
Peut couler des sections très fines (~0.015 in) avec des tolérances incroyablement faibles (~0.003 in)	Les pièces comportant des noyaux ou des trous inférieurs à 1,6 mm ou des trous d'une profondeur supérieure à 1,5 fois le diamètre de la pièce sont difficiles à couler à la cire perdue.
Possibilité d'automatiser le processus, donc de produire une grande quantité de pièces ;	Peut impliquer des équipements et des ressources financières élevées
Différents types de pièces peuvent être fabriqués à partir d'un large éventail de matériaux : aciers inoxydables, fers magnétiques, laiton, etc.	
Des tests approfondis sont effectués tout au long du processus.	

Certains de ces avantages et limites ont été partagés par Suraj Kathale de HCL Technologies.

Alors que l'attention est souvent portée sur le moulage en sable et le moulage à la cire perdue lorsqu'on parle de FA et de moulage, il convient de noter que la FA peut également être une réponse à l'outillage moulé sous pression dans certaines industries comme l'automobile.

Dans un processus de moulage sous pression, le liquide métallique à haute pression est pressé à grande vitesse dans la cavité d'un moule métallique de précision, puis le liquide métallique est refroidi et solidifié sous pression pour former une pièce moulée.

Contrairement aux autres procédés, cette méthode présente les avantages et les inconvénients suivants :

Avantages	Inconvénients
L'efficacité de la production est élevée et les moules de coulée sous pression peuvent être utilisés plusieurs fois.	Longs délais d'exécution
Des exigences réduites en matière de machines de post-coulée	Les grandes pièces ne peuvent pas être moulées
Idéal pour la production en série	

Les applications de la FA dans le moulage sous pression peuvent démontrer comment des canaux de refroidissement conformes imprimés en 3D à proximité de la surface de ces outils créent une matrice thermiquement équilibrée, et comment les avantages se traduisent par une réduction du temps de cycle, des taux de rebut et des coûts de main-d'œuvre.

### Quel processus de FA peut être intégré au moulage sous pression ?

Parfois, l'exploration des voies où la FA et le moulage sont complémentaires se résume à trouver un moyen plus rapide (et quelque peu abordable) de créer le moule avant de compléter le processus de fabrication. Comme vous le savez, dans ce cas, la FA est souvent utilisée pour créer les moules en sable et les noyaux qui sont ensuite utilisés pour fabriquer des pièces par moulage.

Cela dit, le jet de liant reste le procédé le plus largement utilisé avec le moulage – en particulier le moulage en sable. Dans ce procédé, une tête d'impression dépose un liant liquide sur une fine couche de particules de poudre – sable de fonderie, céramique, métal ou composites -. Dans ce cas par exemple, le sable est généralement le matériau d'impression 3D, le liant est une résine de qualité fonderie tandis que le

composant fabriqué est un moule en sable ou un noyau de moule. Cette forme de FA est souvent appelée **impression 3D de sable**, et sur le marché actuel, seuls quelques fabricants ont acquis une solide expertise dans ce domaine. Il s'agit par exemple de **voxeljet**, **ExOne** et **ETEC** (anciennement connue sous le nom d'EnvisionTEC).

En ce qui concerne le moulage à la cire perdue, les applications révèlent que la SLA (stéréolithographie) est une autre technologie qui convient parfaitement aux flux de travail de moulage. Cette technologie permet de produire des pièces métalliques à moindre coût, avec une plus grande liberté de conception et en moins de temps que les méthodes traditionnelles. L'un des objectifs du moulage à la cire perdue est d'utiliser le moins de matériau possible, tout en conservant la



forme et la précision. Cet objectif peut être facilement atteint avec la SLA, où un laser UV durcit et solidifie de fines couches de résine afin d'obtenir des structures internes, des parois fines, une finition de surface et une résolution idéale. Les étapes de fabrication qui mènent au produit final peuvent souvent varier d'un fabricant à l'autre, mais en fin de compte, lorsqu'on utilise des modèles SLA, il est facile de modifier la conception originale du moule à modèle et d'examiner les résultats en quelques jours seulement.

Étant donné que les fonderies de moulage à la cire perdue ne peuvent souvent pas produire de prototypes de moulage tant que le moule d'injection n'est pas terminé, l'impression 3D FDM est souvent utilisée comme une autre option pour produire des modèles de moulage à la cire perdue qui sont beaucoup plus efficaces et rentables.

Ceci étant dit, d'autres éléments qui méritent d'être pris en considération sont les points de vue des matériaux et des logiciels, ainsi que les propriétés mécaniques des pièces obtenues.

### Perspective sur les logiciels

On accorde souvent très peu de crédit au logiciel de conception, alors qu'il peut jouer un rôle crucial dans la réussite de la pièce. Chaque processus de fabrication commence par une conception et, comme toujours, les opérateurs chercheront à obtenir les performances maximales de la pièce en tirant le meilleur parti du processus de fabrication.

Il va sans dire que **le moulage au sable (moule imprimé en 3D) et le moulage à la cire perdue (modèle imprimé en 3D)** ont des contraintes de fabrication différentes, ce qui implique de nombreuses différences au niveau de la conception. Comme on le voit avec certains procédés traditionnels de FA, Martin Solina, vice-président d'Inspire Manufacturing Solutions, [Altair](#), recommande aux fonderies de se poser quelques questions fondamentales avant de passer à la production : « Puis-je couler cette forme ? » C'est la clé pour avoir des pièces saines et sans défauts et pour minimiser les rejets. Quel sera le coût de production ? Comment cela se compare-t-il à une méthode traditionnelle ? Quels sont les avantages ?

Néanmoins, au tout début de la phase de conception, lorsque la FA et le moulage sont explorés dans une approche de fabrication hybride, l'une des préoccupations qui peut surgir pourrait être la bonne façon d'obtenir la géométrie optimale de la pièce. Pour **Martin Solina**, « cela ne devrait pas être une préoccupation car c'est un grand avantage qui peut être obtenu en utilisant un processus hybride. Le moulage hybride présente les avantages des deux mondes : la fabrication additive donne de la flexibilité pour concevoir des modèles légers et optimaux, tandis que le moulage fournit une méthode de fabrication éprouvée avec de bonnes propriétés des matériaux. [Cela signifie qu'] en utilisant l'impression 3D et le moulage, nous maximisons la liberté de conception tout en augmentant les performances et en réduisant le poids des pièces », explique-t-il.



Martin Solina, vice-président d'Inspire Manufacturing Solutions chez Altair

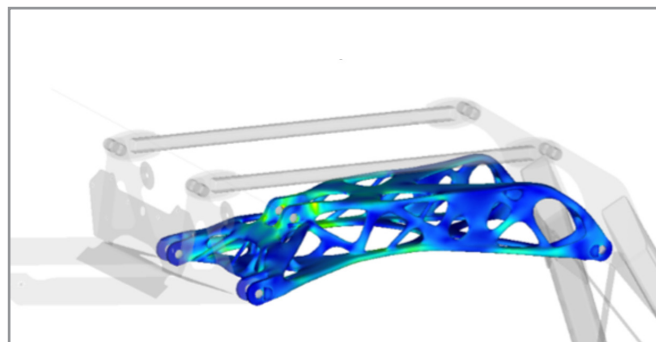
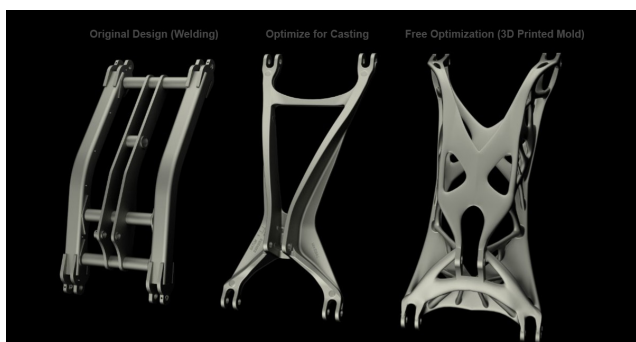




En outre, si dans un processus de moulage traditionnel, il est possible de disposer d'un outil logiciel qui permet d'étudier les paramètres de moulage et d'éliminer les défaillances possibles du processus de moulage pendant la phase de conception, il est logique d'attendre une telle double fonction dans cette approche de fabrication hybride. Pour que l'analyse de rentabilité de FA et du moulage soit convaincante, le logiciel de conception doit permettre aux utilisateurs de faire plus que simplement fournir des outils de CAO. Pour le représentant d'Altair, cela signifie que les ingénieurs de conception devraient – par exemple – être en mesure d'optimiser la « performance de la pièce tout en définissant des règles de fabrication pour assurer la fabricabilité de la pièce pour le processus de fabrication particulier. Les logiciels de conception doivent donner à l'utilisateur la liberté de redéfinir la pièce et de fournir des réponses rapides aux questions concernant les performances dans différents cas de charge, la fabricabilité, la prédiction des défauts ou la validation du processus de fabrication. Sur cette base, le rôle d'un logiciel de conception a aujourd'hui changé, passant d'un outil de CAO de base à un outil de conception axé sur la simulation qui fournit un

retour d'information pour améliorer et optimiser la conception de la pièce et des processus en intégrant l'optimisation de la topologie et différents types d'outils d'analyse et de simulation comme l'analyse structurelle, thermique ou des fluides. La simulation de fabrication et de nombreux autres outils aident les concepteurs à prendre des décisions sur la base d'informations, comme par exemple :

- Créer et modifier des conceptions en toute simplicité : Créez, modifiez et défaites rapidement des modèles solides, utilisez PolyNURBS pour créer une géométrie lisse de forme libre et étudiez plusieurs configurations d'assemblage.
- Optimiser pour la fabrication : Arrivez à la direction idéale de la conception extrêmement tôt dans le processus : l'optimisation de la topologie est basée sur la physique et observe les contraintes du processus de fabrication.
- Simulez à la vitesse de la conception : Découvrez un environnement de conception technique interactif pour une exploration rapide de la conception et la création de produits, sans avoir à investir dans un nouveau matériel informatique. »



Légende : Le bras culbuteur! La voie vers des machines agricoles plus légères grâce à l'optimisation de la topologie et à la simulation de fabrication – Altair, Amazone et Voxeljet ont non seulement rendu un bras oscillant plus léger et plus durable, mais aussi avec moins de variations de rigidité. Le culbuteur était au départ une pièce soudée de 245 kg, avec des soudures de 16,5 m, dont la production était très longue et coûteuse. Ils ont fini par couler la pièce avec un poids inférieur de 8%, des coûts de production plus bas et une plus grande flexibilité pour les clients en matière de modules complémentaires.

Sur le plan pratique, il ne faut pas oublier que la «conception» dépend beaucoup de «l'élément humain», ce qui signifie que deux ingénieurs concevant la même pièce n'obtiendront pas toujours exactement le même «rendu», sans compter que la complexité de la pièce – si elle n'est pas bien gérée – peut entraîner des défauts, une faible performance de la pièce, un poids excessif, un délai de commercialisation trop long et même des opérations coûteuses de reconception et de révision des conditions du processus.



Pour répondre aux exigences actuelles de performance, de réduction de poids et surtout de coûts, il est nécessaire de tirer parti de nouveaux processus et de composants de conception pour que ces processus nécessitent la combinaison de nouvelles fonctionnalités logicielles, notamment :

- La géométrie paramétrique qui offre la possibilité d'effectuer des modifications et des changements de géométrie en fonction de l'analyse et de la simulation.
- L'analyse structurelle et de mouvement ou dynamique pour comprendre les conditions de travail de la pièce analysée.
- L'optimisation de la topologie pour améliorer les performances de la pièce et réduire son poids en fonction des conditions de travail.
- La simulation de fabrication pour prédire le remplissage du moule et l'analyse thermique pour différents types de processus de moulage tels que le moulage à la cire perdue ou le moulage en sable par gravité, en tenant compte des différents types de moules imprimés 3D.
- Et surtout, toutes ces fonctionnalités qui doivent être liées les unes aux autres de manière transparente pour l'utilisateur », souligne Martin Solina.

### Perspective sur les matériaux

L'une des principales préoccupations souvent soulevées par les matériaux est celle des **propriétés mécaniques**. Avons-nous des résultats satisfaisants lorsque nous évaluons la résistance à la traction, la dureté, la rugosité de surface et la microstructure de la pièce ?

Dans un processus de moulage en sable traditionnel, par exemple, trois matériaux/systèmes de liaison sont souvent utilisés et il est facile de penser qu'ils peuvent être directement transférés aux méthodes de production par FA.

En regardant le moulage au sable, la réponse classique est « ça dépend », **Christian Traeger** apporte une nuance : « La plupart des matériaux utilisés le sont depuis des siècles dans le moulage des métaux : sable et résine furanique. D'autres types de liants, comme les liants phénoliques ou inorganiques sont également traitables par la FA. En fonction du liant utilisé, la configuration du système doit également être adaptée. La liaison directe furanique nécessite de mélanger le sable avec un promoteur qui réagit avec le liant et colle les particules de sable ensemble. Les liants phénoliques et inorganiques fonctionnent tous deux avec du sable non mélangé. En irradiant les plates-formes de construction par la température, les résines réagissent et collent les particules de sable ensemble. Comme le sable non imprimé n'est pas mélangé, il est beaucoup plus facile à recycler et à réutiliser. Dans le domaine du moulage à la cire perdue, nous constatons une grande acceptation et un intérêt croissant du marché pour l'ensemble des matériaux PMMA. La production rapide et l'intégration parfaite dans les chaînes de processus existantes sont les principaux avantages. La seule façon d'optimiser davantage ce matériau est d'améliorer encore la qualité de la surface ».

En outre, la recherche révèle que la **production de moules par jet de liant** requiert **plusieurs propriétés de base des matériaux** pour les différentes étapes du processus. Le matériau des particules doit s'écouler librement pour remplir la forme du modèle. Le liant doit avoir une très faible viscosité pour le dosage et pour les caractéristiques d'écoulement du matériau de moulage qui en résulte. Ces deux propriétés constituent également une base pour le traitement des matériaux dans les machines dans le



Christian Traeger

cadre du processus de projection de liant. Par conséquent, les matériaux peuvent être utilisés dans les imprimantes 3D sans modification majeure de leurs propriétés physiques ou chimiques.

Nous avons ensuite demandé à **Christian Traeger** de voxeljet si les pièces produites par FA et une méthode de moulage possèdent les mêmes propriétés mécaniques que les pièces produites par moulage comme seule méthode de production. Il a répondu par l'affirmative.

« La raison en est que le processus de moulage lui-même reste exactement le même qu'auparavant. En utilisant des matériaux de fonderie typiques tels que la silice et les sables spéciaux et des liants furaniques, phénoliques ou inorganiques complémentaires, nous ne changeons que la façon dont les moules, les modèles et les noyaux sont construits. Au sein de la fonderie, les pièces imprimées en 3D peuvent être intégrées dans les chaînes de processus existantes. Comme les propriétés mécaniques des pièces moulées dépendent principalement des propriétés de l'alliage utilisé, la fabrication additive n'a aucune influence sur celles-ci. Bien sûr, il faut garder à l'esprit certains détails lors de la conception du moule ou du modèle, comme le nettoyage des pièces imprimées. De même, la qualité de la surface dépend du matériau utilisé et peut présenter des différences par rapport aux matériaux utilisés dans la fabrication conventionnelle, mais lorsque tous ces détails sont pris en compte, et que le métal est coulé, les pièces présentent exactement les mêmes propriétés mécaniques que les pièces coulées fabriquées de manière conventionnelle. »

## Qu'en est-il de la productivité et des coûts ?

Le calcul est en général rapide lorsqu'on compare le temps de production avec la FA avec le temps de production de la même pièce obtenue par un procédé de fabrication conventionnel : la FA l'emporte généralement, quoi qu'il arrive. Ce qui est intéressant ici, c'est de découvrir les étapes qui sont supprimées dans un processus de FA, mais qui restent nécessaires dans un processus de moulage.

Disons par exemple que le temps de production est calculé à partir du moment où le fabricant de pièces reçoit la géométrie CAO 3D d'un client. Le processus de moulage d'une pièce de complexité moyenne peut nécessiter deux boîtes à noyaux supplémentaires pour l'équipement de moulage. Les opérateurs auront besoin de trois jours pour redessiner un modèle 3D avec tous les angles de dépouille nécessaires et préparer les géométries de modèle 3D. Deux semaines supplémentaires seront nécessaires pour passer des géométries 3D à un modèle prêt à l'emploi : cela comprend l'usinage CNC pour les négatifs, l'usinage CNC pour les boîtes à noyaux, la copie des modèles en époxy et la fabrication du système de porte. Sans compter le temps supplémentaire nécessaire pour la production principale et le formage.

La FA, comme vous le savez peut-être, ne nécessite pas toutes ces étapes. Pour la même pièce, l'opérateur aura besoin de quelques heures pour préparer un programme et commencer à produire la pièce. La majeure partie du temps est consacrée au processus d'impression, qui peut prendre jusqu'à trois jours, en fonction de la vitesse de la machine. Ensuite, l'opérateur peut consacrer quelques heures aux différentes étapes de post-traitement qui doivent être réalisées.

Néanmoins, un avantage qui mérite d'être mentionné est que dans un processus de coulée, un moule contient plus d'une pièce, ce qui signifie que dans un processus de coulée, il est possible de produire 10 pièces. Ce nombre est susceptible de varier – et n'est pas toujours atteint – avec une imprimante 3D. Si le moulage reste un procédé intéressant pour la production en série, la



FA convient parfaitement aux pièces très complexes et aux productions pour lesquelles le temps est un facteur limitant.

« La FA fonctionne avec des données CAO numériques et ne nécessite aucune forme d'outillage. La production d'un outillage conventionnel peut prendre jusqu'à 12 semaines et ce n'est qu'ensuite que le processus de moulage pour cette pièce spécifique peut commencer. Le procédé de jet de liant peut créer des moules et des modèles en quelques heures ou quelques jours, réduisant ainsi jusqu'à 75 % le temps nécessaire à la création d'un prototype, par exemple. Le procédé de jet de liant est une technologie de processus relativement extensible, ce qui veut dire que les volumes de construction et la productivité peuvent être augmentés, ce qui rend la technologie non seulement adaptée à la production de prototypes, mais aussi à des lots de petite et moyenne taille », commente Christian Traeger.

Toutefois, lorsqu'on lui demande si la combinaison de FA-moulage est le moyen le plus rentable de produire des pièces – si on compare avec les autres procédés de FA métal il répond :

« Cela dépend du matériau et de la taille de lot requise. Pour les prototypes et les petites séries, le processus de moulage assisté par FA est beaucoup plus rentable que le frittage laser direct des métaux, par exemple. Cela s'explique par les matériaux d'impression et les alliages de moulage. Un kilo d'aluminium coûte environ 6,50 EUR lors du moulage. Les alliages d'acier spéciaux peuvent coûter jusqu'à 38 EUR. Les mêmes matériaux, mais pour les technologies de FA, peuvent coûter entre 78 et 133 euros par kilogramme.

En ce qui concerne la taille des lots, l'injection de liant dans les moules, les noyaux et les modèles est rentable pour les prototypes et les lots de petite et moyenne taille. Le jet de liant est l'une des technologies de FA les plus productives et peut être facilement adapté pour répondre aux besoins de lots plus importants. Elle permet également de construire des volumes supérieurs aux capacités des imprimantes à métaux existantes. Si le jet de liant métallique est bien sûr une technologie en plein essor, les volumes de fabrication ne sont toujours pas à la hauteur de ceux offerts par les imprimantes à sable. Dire que la coulée de métal assistée par jet de liant est le moyen le plus rentable de produire des pièces métalliques est une affirmation forte et un peu tirée par les cheveux. Dans certains scénarios, comme ceux décrits ci-dessus, la rentabilité du jet de liant est très difficile à battre, mais ces scénarios doivent être identifiés et soigneusement évalués pour trouver la meilleure solution. »



## Réflexions finales

L'industrie de la fonderie n'est peut-être pas connue pour sa rapidité, mais l'économie et les opportunités sont tout simplement trop bonnes pour être laissées de côté. Cette industrie est responsable des pièces qui alimentent la vie quotidienne, l'économie et de nombreuses autres industries. Pourtant, lorsque nous regardons la fabrication, le secteur reste l'un des plus grands perdants avec des baisses de production d'environ 30% en raison de la crise et d'autres transformations en cours dans les industries. Le prix et le temps de production font de la FA un candidat attrayant et compétitif pour résoudre une partie de ce problème, surtout si l'on considère la production de petites pièces et de petites quantités (jusqu'à 5 pièces).

De plus, comme le mentionne **voxeljet**, malgré le coût élevé des équipements de FA, on constate que les fabricants de machines continuent d'investir du temps et des ressources pour développer un portefeuille qui peut facilement permettre à ces industries de faire évoluer leur production pour des besoins de taille de lot plus importante. Enfin, au-delà de ces investissements, il est essentiel de garder à l'esprit que, dans le cadre de cette approche de fabrication hybride impliquant la FA et le moulage, le bon logiciel de conception et l'utilisation de ce logiciel peuvent parfois faire toute la différence, non seulement pour mouler «l'impossible à mouler», mais aussi pour obtenir les avantages idéaux en termes de temps, de coûts et de performances.

### Ressources et contributions :

Plusieurs ressources et contributions ont été mises à profit pour produire ce contenu exclusif. Deux entreprises ont également été invitées à partager leurs réflexions en tant qu'experts sur le sujet :

**Voxeljet**, une entreprise industrielle d'impression 3D connue pour le développement de puissants systèmes d'impression 3D pour les grands composants ou les grandes séries de petits composants. En ce qui concerne la FA et le moulage, l'entreprise se concentre sur le **moulage en sable** et le **moulage à la cire perdue**. « Avec notre technologie, nous imprimons directement le moule à partir des données CAO. Ce qui rend les outils obsolètes et réduit considérablement les coûts et les délais de livraison. En fait, nous imprimons un moule négatif pour créer une pièce positive. Un autre procédé de moulage adapté à la FA est le moulage à la cire perdue. Ici, au lieu de créer un moule, nous imprimons un modèle positif en PMMA. Dans le processus de moulage à cire perdue, ces modèles sont recouverts d'une boue de céramique pour former une coquille. En brûlant la céramique, le modèle fond et il reste à couler la coquille creuse. Traditionnellement, ces modèles sont produits à partir de cire. Mais la cire a tendance à briser la coquille en céramique lorsqu'elle n'est pas soigneusement brûlée. Le PMMA, en revanche, a un facteur de dilatation thermique négatif, ce qui signifie que le matériau ne se dilate pas au contact de la chaleur. Cela réduit considérablement le risque de rupture de la coquille pendant la cuisson, mais aussi les taux de rejet, le temps de construction de la coquille et le processus global de moulage à la cire perdue. Grâce à un post-traitement de surface supplémentaire, la qualité de surface des pièces en PMMA imprimées en 3D peut également être améliorée, par exemple par infiltration de cire », la société a déclaré à 3D ADEPT Media.

**Altair Engineering**, multinationale des technologies de l'information qui fournit des solutions logicielles et cloud pour la simulation, l'IoT, le calcul haute performance (HPC), l'analyse de données et l'intelligence artificielle (IA) a été invitée à prendre part à ce dossier. La plateforme **Altair Inspire** accélère la conception pilotée par la simulation. Appliquée au début du cycle de vie du développement du produit, Inspire accélère la création, l'optimisation et l'étude de pièces et d'assemblages innovants et structurellement efficaces grâce à la collaboration. L'expérience utilisateur primée d'Altair Inspire pour la création et la modification de géométries peut être apprise en quelques heures seulement, et offre notamment :

- L'analyse structurelle avec la vitesse et la précision d'Altair SimSolid - validée indépendamment par NAFEMS - offre la possibilité d'analyser de grands assemblages et des pièces complexes.
- La simulation dynamique des mouvements, y compris l'extraction des charges, grâce à l'analyse fiable des systèmes multi-corps d'Altair MotionSolve.
- La norme industrielle pour l'efficacité structurelle, l'optimisation de la topologie par Altair OptiStruct, pour la conception générative d'une géométrie pratique, viable et manufacturable.

« Notre plateforme offre un ensemble unique d'outils de simulation pour évaluer la faisabilité d'un produit, optimiser le processus de fabrication et effectuer des essais virtuels pour de nombreux processus de fabrication traditionnels, soustractifs et additifs. Les utilisateurs peuvent valider les conceptions au début du processus de fabrication grâce à la simplicité et à l'accessibilité du logiciel de simulation, ainsi qu'utiliser la technologie d'optimisation avec des contraintes de fabrication spécifiques pour concevoir des produits meilleurs et plus efficaces », a déclaré la société.

[A. Vevers](#), [A. Kromanis](#), [E. Gerins](#) et [J. Ozolins](#), [Recherche](#). [Disponible en anglais] Additive Manufacturing and Casting Technology Comparison: Mechanical Properties, Productivity and Cost Benchmark.

# TRAITEMENT THERMIQUE POUR LES PIÈCES FABRIQUÉES DE MANIÈRE ADDITIVE : UN SALE PETIT SECRET QUI RESTE À COMPRENDRE

Dans un précédent dossier consacré à [l'utilisation des fours en fabrication additive](#), nous avons découvert que les raisons qui peuvent aider à cataloguer le type de fours que les fabricants vont utiliser, dépendent souvent du processus que la pièce va subir : **frittage** (et souvent **déliantage**) d'une part, et **traitement thermique** d'autre part. Le traitement thermique est un goulot d'étranglement très sous-estimé... pourtant, la compréhension approfondie de ce processus peut aider les fabricants à éviter toute une série de problèmes inattendus.

Lorsqu'on examine les différentes étapes de post-traitement qui peuvent être réalisées dans un processus de fabrication additive, il est facile de comprendre pourquoi l'élimination de la poudre est une priorité absolue. Tout ce qui entoure ce processus est relativement « nouveau », alors que pour le traitement thermique, les opérateurs voient facilement certaines similitudes entre les étapes qu'ils doivent suivre, pour traiter thermiquement leurs pièces imprimées en 3D et les étapes à suivre lorsque la pièce a été fabriquée par une voie traditionnelle. C'est probablement là que se trouve le piège. Ils ne voient que des « similitudes ».

Cet article vise à mettre en évidence les principales différences entre le traitement thermique effectué pour la FA et le traitement thermique effectué pour les procédés de fabrication traditionnels. Un accent particulier sera mis sur les étapes typiques du traitement thermique et les considérations à prendre en compte pour les procédés L-PBF, l'EB-PBF et le Binder jetting (*fusion laser sur lit de poudre, fusion par faisceau d'électrons sur lit de poudre et jet de liant*).

## Traitement thermique : FA vs procédés de fabrication traditionnels.

Pour rappel, le traitement thermique consiste à chauffer un matériau à une température spécifique puis à le refroidir pour améliorer ses propriétés mécaniques. En théorie, le processus comporte trois étapes différentes\*\* : le chauffage, le trempage et le refroidissement. En pratique, les degrés et les cycles sont différents, et parfois, il peut y avoir de légères variations en fonction du procédé de FA métal utilisé. Il faut noter que ces cycles sont souvent appelés procédés ou techniques de traitement thermique. Quatre d'entre eux\*\* se distinguent (de la masse) : le recuit, la normalisation, la trempe et le revenu.

« Les différences entre les cycles de traitement thermique sont basées sur la chimie [comprenez, la chimie du matériau traité]. La chimie dicte quelle étape du traitement thermique vous devez suivre pour obtenir les propriétés souhaitées. C'est la raison pour laquelle, par exemple, des alliages différents nécessitent des cycles de traitement thermique différents. Même au sein d'un même alliage, vous pouvez également avoir différents niveaux de traitement thermique. Dans ces cas, c'est la chimie qui dicte ce qui va se passer si vous chauffez la pièce d'une certaine manière », a déclaré **Anthony Mott**, responsable mondial de la fabrication additive chez **Wabtec**, à 3D ADEPT Media.

Reconnue pour la fabrication de produits destinés aux locomotives, aux wagons de marchandises et aux véhicules de transport de passagers, Wabtec a fait un véritable tabac dans l'industrie de la fabrication additive l'année dernière, lorsqu'elle est devenue le locataire principal de **Neighborhood 91**, un centre d'approvisionnement en fabrication additive situé sur le campus de l'aéroport, qui s'étend sur 195 acres. Mott et son équipe ont pour mission d'intégrer la FA au sein de l'entreprise. Pour ce faire, ils travaillent avec d'autres ingénieurs de l'entreprise pour comprendre les applications et explorer les domaines dans lesquels il est judicieux d'appliquer la FA.





Les raisons d'effectuer un processus de traitement thermique varient donc d'une application à l'autre et l'objectif à atteindre. Il peut s'agir de ramollir le métal dans un cas, tandis que dans un autre, l'objectif peut être d'augmenter la dureté ou de développer certaines propriétés mécaniques du métal ou de l'alliage utilisé.

Lorsqu'on essaie de comparer le traitement thermique effectué pour la FA et le traitement thermique effectué pour les processus de fabrication traditionnels, il n'y a « que peu ou pas de différences entre ces deux types de processus de fabrication. Si vous utilisez la même chimie exacte du côté traditionnel, par exemple, le matériau est le même et c'est ce qui dicte réellement votre profil de traitement thermique. Avec la FA, le seul changement est que vous pouvez avoir un profil de température plus étroit. Par exemple, vous pouvez traiter un alliage de nickel haute performance par des procédés traditionnels entre 1750° et 1950°, alors qu'avec la fabrication additive, vous le traiterez entre 1850 et 1875° - C'est pourquoi je parle d'une fenêtre beaucoup plus étroite pour le même profil. Les raisons pour lesquelles vous pouvez avoir des écarts de température sont qu'avec la FA, nous avons un bain de fusion qui fait fondre votre matériau et qui refroidit rapidement. Vous avez des microstructures beaucoup plus petites, des structures vertes beaucoup plus petites par rapport à une pièce moulée qui a de très grandes zones de refroidissement fondues. C'est pourquoi vous avez besoin de profils de processus étroits. Cela vous permettra d'obtenir des propriétés constantes grâce à ce traitement thermo-chimique », Mott explique.



Anthony Mott, Global Additive Manufacturing Leader at Wabtec.



L'explication de Mott met en évidence trois considérations essentielles à prendre en compte lors de la réalisation d'un traitement thermique : la température, les matériaux et les défis de la microstructure.

Par nature, le traitement thermique est une question de contrôle : contrôle des températures de chauffage, contrôle des vitesses de refroidissement et des types de trempes utilisés pour obtenir les propriétés souhaitées.

Dans le même ordre d'idées, il est normal de constater de légères différences dans la réaction des matériaux traités par des procédés traditionnels par rapport à ceux traités par FA. « Il est difficile d'imprimer des pièces en 3D avec des matériaux contenant de grandes quantités de carbone, comme de nombreux aciers. Le carbone entraîne des problèmes dans la resolidification microscopique qui se produit dans le processus de FA. Il peut affecter l'expansion, la contraction, le rétrécissement et les contraintes localisées, ce qui fait que les pièces imprimées en 3D avec un matériau à forte teneur en carbone présentent des problèmes de fissuration une fois terminées. Si le carbone complique considérablement l'impression 3D, il est essentiel dans de nombreux processus de traitement thermique », note un expert de **Paulo**. - Paulo est une organisation qui a consacré son activité principale à relever les défis du traitement thermique.

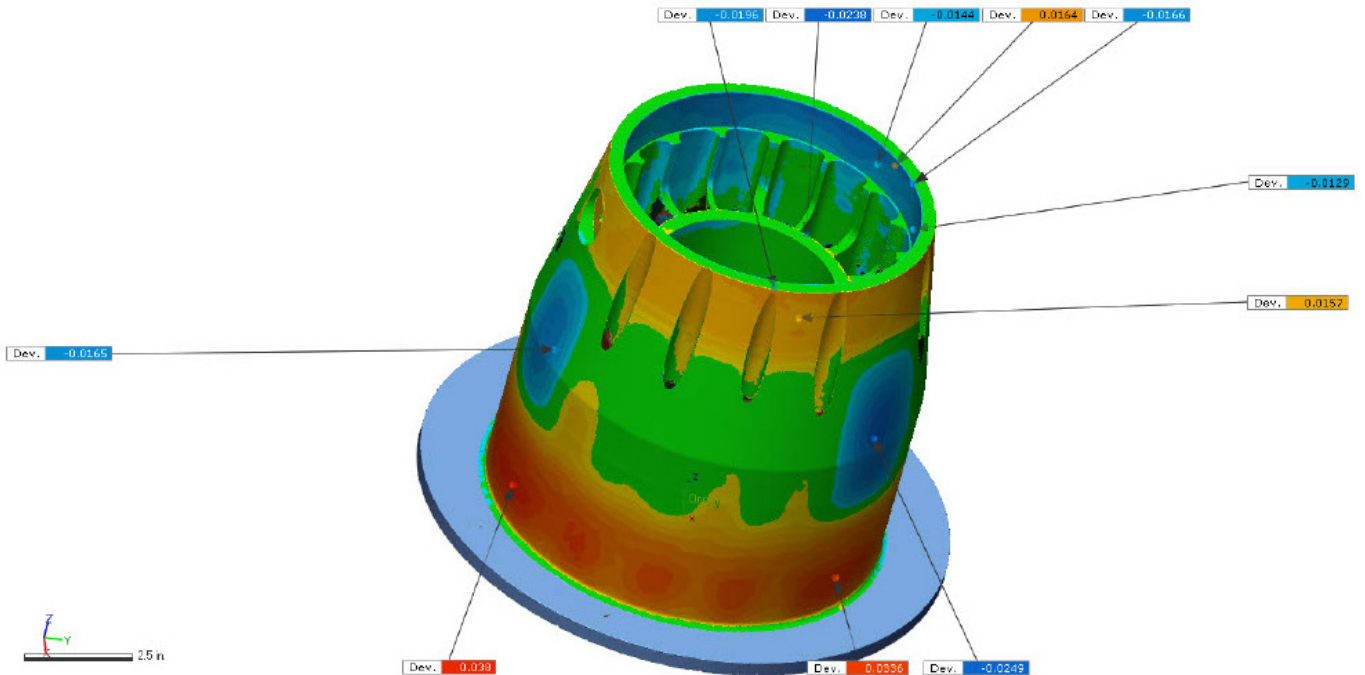
Outre les matériaux, une chose qui est souvent difficile à éviter dans le traitement thermique est la déformation des pièces imprimées en 3D. Cette déviation du composant par rapport à la forme créée par le processus de FA peut être causée par une variété de charges placées sur ou à l'intérieur de la pièce par le processus de FA ou par le milieu environnant. Pour certains experts, plus la pièce est complexe, plus elle est susceptible d'offrir des tolérances serrées qu'on n'a pas toujours avec les procédés de fabrication conventionnels tels que l'usinage, et plus les chances d'être confronté à une certaine déformation sont grandes. Sur ce point précis, les experts ont plusieurs avis pour atténuer les risques de distorsion :

Pour l'équipe de Paulo, « les risques de distorsion peuvent être atténués par des ajustements précis de la conception initiale de la pièce pour obtenir une géométrie dans la pièce traitée qui conviendra à l'application. » Pour d'autres, on peut traiter thermiquement les pièces en même temps que la plate-forme de construction **pour éviter toute distorsion importante**. Une autre idée intéressante vient du fournisseur de services de fabrication additive métal

et de l'atelier d'usinage CNC **Wagner Machine** qui scanne en 3D pratiquement chacune de ses pièces imprimées en 3D après leur traitement thermique. L'idée de l'équipe d'ingénieurs de Wagner est de saisir toutes les informations possibles qui peuvent les aider à comprendre l'effet du traitement thermique sur les pièces imprimées en 3D, afin de mieux prédire la distorsion induite par le traitement thermique.

Pour illustrer ce point, l'entreprise a partagé l'image d'un boîtier

de générateur de microturbine qu'elle a créé en utilisant l'alliage d'aluminium F357 sur une imprimante 3D LPBF. La pièce mesure environ 23 cm de diamètre sur 23 cm de hauteur (9 pouces x 9 pouces) et présente de grands espaces ouverts à l'intérieur de sa forme, à travers lesquels le carburant circule pour refroidir la pièce. Après une analyse minutieuse, l'équipe a admis que ces ouvertures non soutenues augmentaient la marge de distorsion potentielle.



Cependant, si la plupart du temps, l'objectif principal du traitement thermique est de stabiliser la microstructure métallique et d'équilibrer les propriétés du matériau ; on note de plus en plus que ces défis de microstructure peuvent varier d'un procédé d'impression 3D métal à l'autre.

**Considérations à prendre en compte pour les procédés L-PBF, EB-PBF et Binder jetting**

Parmi l'éventail des procédés de FA métal commercialisés sur le marché, il y a de fortes chances que vous ayez déjà entendu parler ou que vous travaillez avec la **fusion laser sur lit de poudre (L-PBF), la fusion sur lit de poudre par faisceau d'électrons (EB-PBF)** ou encore le **jet de liant**. Lorsque votre pièce est fabriquée à l'aide de l'un de ces procédés, il est presque toujours conseillé d'appliquer un traitement thermique au stade du post-traitement. Toutefois, les applications de ce procédé peuvent présenter quelques différences. Le responsable global de la fabrication additive de Wabtec met en évidence les plus importantes :

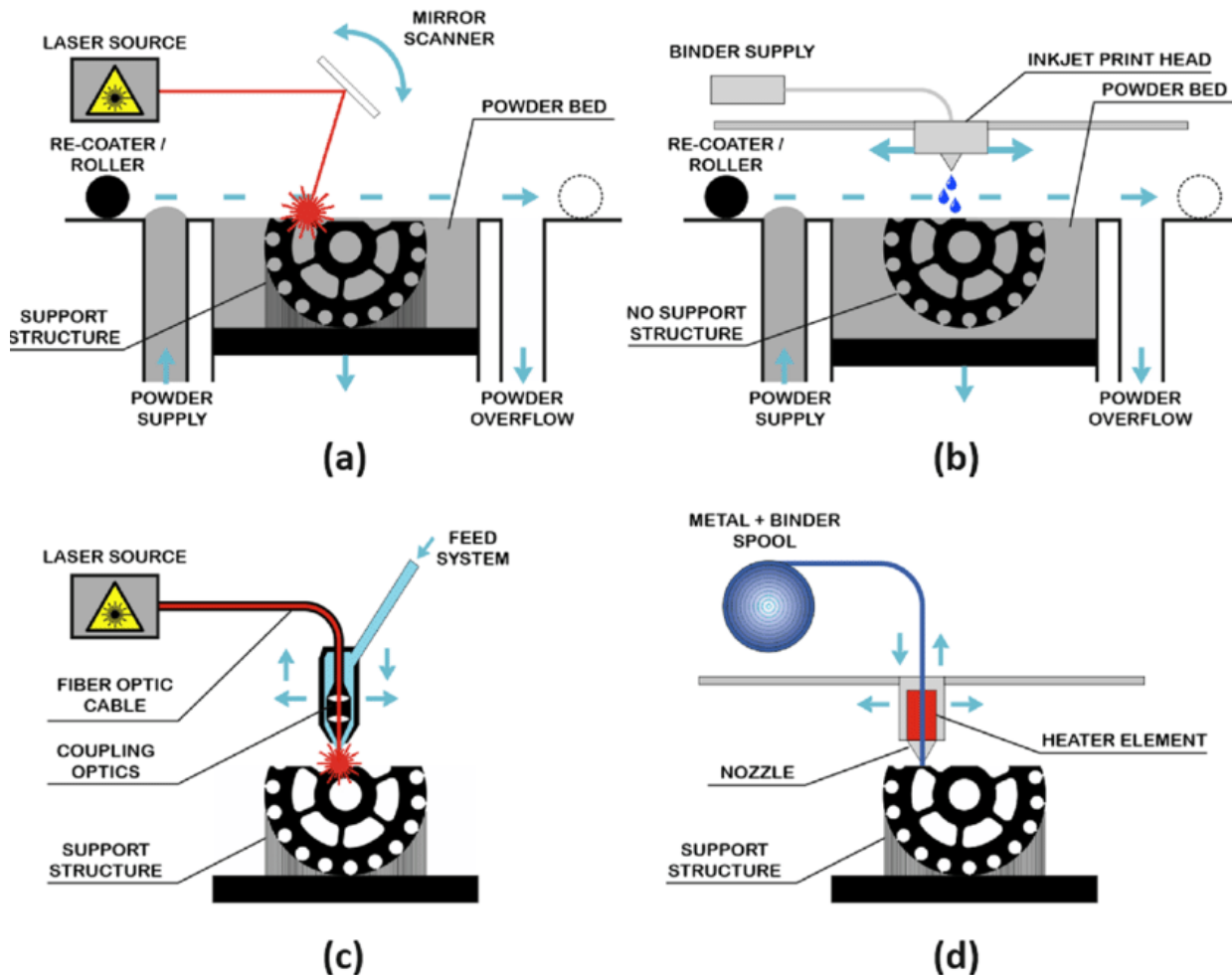
« Il y a quelques changements qui se produisent dans les trois procédés de FA. Par exemple, dans le procédé L-PBF, la température de fabrication varie entre 50 et 200 °C. Cela crée des contraintes très élevées dans la pièce, d'où l'utilisation d'un traitement thermique de détente suivi d'un traitement thermique complet. Pour le jet de liant, vous devez éliminer le liant de la pièce, c'est pourquoi vous devrez effectuer une étape

de déliantage avant un processus de frittage. Ce n'est qu'après cette étape que vous pourrez éventuellement appliquer le même traitement thermique que celui que vous utiliseriez pour le procédé L-PBF. Dans le cas de la fusion par faisceau d'électrons, la température à laquelle vous serez confronté peut aller de 600 à 1000°C. Dans ce procédé, lorsque vous imprimez, même si vous imposez une forte contrainte à votre pièce, vous exécutez un profil de contrainte, de sorte que vous n'aurez pas nécessairement besoin d'un traitement de réduction de la contrainte. »

En prenant l'exemple de la fusion laser sur lit de poudre (LPBF), l'expert de Paulo met l'accent sur un phénomène appelé **microségrégation**, qui est le résultat de la **solidification et de la resolidification** de chaque couche pendant le processus d'impression.

« Dans ces conditions, le processus de FA lui-même crée une série de bassins de fusion microscopiques (essentiellement des bassins de soudure) dans toute la structure intérieure de la pièce. Même si cela est avantageux en gardant la microstructure de la pièce très fine, ces bassins de fusion microscopiques peuvent présenter des problèmes de ségrégation dans le matériau, les particules se séparant en zones distinctes et affectant la structure globale de la pièce. Ce phénomène peut en fait jouer en votre faveur, car l'homogénéisation de la microstructure peut se produire plus rapidement dans certaines pièces imprimées en 3D, ce qui réduit les temps de maintien pendant le traitement thermique. »





1. Procédés courants de FA des métaux : (a) fusion laser sur lit de poudre (L -PBF), (b) jet de liant (BJ), (c) dépôt par énergie dirigée (DED), (d) modélisation par dépôt de fusible (FDM).

Le tableau ci-dessous résume ce qui caractérise le traitement thermique pour chacun de ces procédés de FA métal :

<b>Procédés de FA métallique</b>	Laser powder-bed fusion (L-PBF – en français: Fusion laser sur lit de poudre)	Electron beam powder-bed fusion (EB-PBF) – en français: Fusion par faisceau d'électrons sur lit de poudre	Binder jetting (BJ) – en français: jet de liant
<b>Description</b>	Ce procédé utilise un laser pour fritter ou fusionner ensemble des particules de poudre atomisées. Comme la plupart des procédés additifs, il est réalisé couche par couche jusqu'à ce que la pièce soit terminée.	Dans cette méthode de fusion sur lit de poudre, un faisceau d'électrons est utilisé pour faire fondre et fusionner les matériaux en poudre.	Dans le cas du Binder Jetting, un liant est déposé de manière sélective sur un lit de poudre, liant ces zones ensemble pour former une pièce solide, une couche à la fois.
<b>Type(s) de traitement thermique que vous êtes susceptible d'effectuer :</b>	Avec la fusion et le refroidissement rapides de chaque couche, des contraintes résiduelles sont créées dans les composants fabriqués. Cela signifie qu'un cycle de détente devra être effectué pour minimiser la distorsion.  Selon l'alliage utilisé et la densité à atteindre, un traitement HIP (Hot Isostatic Press) peut être effectué.	Dans ce procédé, les traitements de détente ne sont pas nécessaires étant donné le processus de poudrage à chaud de la technologie.  Selon l'alliage utilisé et la densité à atteindre, un traitement HIP (Hot Isostatic Press) peut être effectué.	Le frittage ( <a href="#">Sintering</a> ) est nécessaire dans ce processus afin d'obtenir la densité souhaitée de la pièce. (Avant cette étape, une étape de déliantage doit être effectuée).

## Avec toutes ces considérations, comment vérifier si un cycle de traitement thermique a été effectué avec succès ?

Anthony Mott partage trois conseils qui peuvent aider les opérateurs à vérifier s'ils ont effectué avec succès leurs cycles de traitement thermique :

1. Des thermocouples peuvent être fixés sur les zones les plus épaisses afin de s'assurer que le processus se déroule à la température souhaitée.

2. Les opérateurs peuvent également utiliser un «coupon sacrificiel» qu'ils imprimeront

avec la pièce. Vous imprimez un cylindre avec un trou, et vous placez un taux de thermocouple à l'intérieur de ce trou. Il servira de représentation de ce que votre pièce subira en cas de variation de température.

3. Enfin, la dernière opération la plus courante consiste à imprimer des coupons d'essai de traction ou de densité, à les casser ou à les analyser pour s'assurer que vous obtenez les propriétés souhaitées dans la bonne zone de votre pièce.

### Et maintenant ?

Malgré les progrès et les précautions qu'on peut prendre au cours du processus de fabrication, il est parfois difficile de faire face

à la variabilité des propriétés mécaniques qui se produit lorsque la pièce fabriquée est soumise à différents traitements thermiques et paramètres de processus. En réalité, même si les technologies de fabrication utilisées sont performantes, **le résultat de chaque fabrication est largement influencé par l'application et la fiabilité du produit.** Nous ne sommes peut-être pas au bout des «et si» qui régissent les cycles et les processus de traitement thermique lorsqu'ils sont combinés à la FA, mais en partageant leurs expériences globales, les utilisateurs peuvent apprendre de la route du succès ou des échecs des uns et des autres.

### Notes aux lecteurs :

Voici quelques explications sur les principaux termes utilisés dans cet article.

Le traitement thermique comprend trois étapes différentes\*\* : **le chauffage, le trempage et le refroidissement.**

Lors de la phase de chauffage, il s'agit avant tout de s'assurer que le métal chauffe de manière uniforme. L'étape de trempage a pour but de maintenir le métal à la température appropriée jusqu'à ce que la structure interne souhaitée prenne forme. Lors de la phase de refroidissement, vous devez ramener le métal à la température ambiante, mais il existe différentes façons de procéder selon le type de métal.

(Description via [Kloeckner Metals](#)).

Quatre procédés de traitement thermique ont été mentionnés dans l'article\*\* : **le recuit, la normalisation, la trempe et le revenu.**

Le recuit est un procédé de traitement thermique utilisé pour modifier la microstructure d'un métal

afin d'améliorer sa ductilité tout en réduisant les contraintes internes et la dureté globale.

Les traitements thermiques de trempage sont utilisés pour améliorer la dureté de la surface du métal par chauffage et refroidissement rapide. Le matériau est chauffé dans un four de trempage à une température qui transforme sa structure interne sans le faire fondre.

La trempage fait spécifiquement référence aux traitements thermiques qui reposent sur un refroidissement rapide du métal pour obtenir les propriétés physiques ou mécaniques souhaitées. Les matériaux chauffés sont souvent refroidis dans l'huile, mais peuvent également être trempés à l'air, à l'eau et dans la saumure, selon le matériau et les qualités souhaitées.

Le revenu est un processus de traitement thermique à basse température normalement effectué après un processus de durcissement afin d'atteindre un rapport dureté/ténacité souhaité.

(Descriptions partagées par [S.M. Engineering & Heat Treating](#)).



## Gas-Atomized Titanium Powder

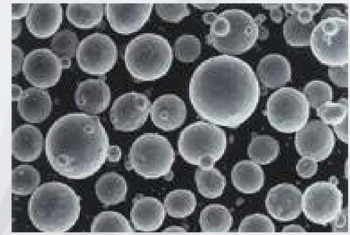
# TILOP

## Titanium Low Oxygen Powder

OTC has been producing titanium powder since 1991. The manufacturing process employs the gas atomization method, which is the most suitable for mass production. As one of the largest manufacturers of aerospace grade titanium sponge, we provide a stable supply high quality titanium powder that meets all your requirements.



Appearance



### Possible powder for production

- CP Titanium
- Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4V ELI
- Trially produced other alloys (e.g. Ti-Al Alloys, Ti-6Al-7Nb)

### Markets & Applications

- Additive Manufacturing (AM)
- Metal powder Injection Molding (MIM)
- Hot Isostatic Pressing (HIP)
- Others

OSAKA Titanium technologies Co.,Ltd.

URL <https://www.osaka-ti.co.jp/>

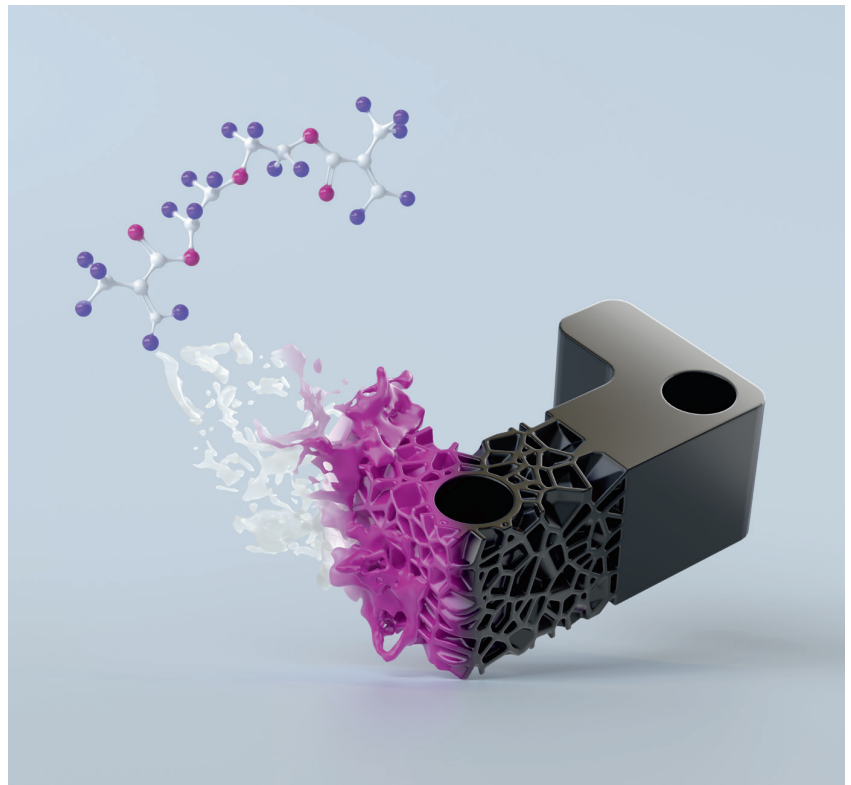
Contact Address High-performance Materials Sales and Marketing Group  
Tokyo Office / Sumitomo Hamamatsucho Building 8F, 1-18-16 Hamamatsucho, Minato-ku, Tokyo 105-0013, Japan  
Tel:+81-3-5776-3103, Fax:+81-3-5776-3111 E-mail: [TILOP@osaka-ti.co.jp](mailto:TILOP@osaka-ti.co.jp)

## New photopolymer resins for impact-resistant 3D parts

We boost the chemistry of high-performance polymers and additives into ready-to-use 3D printing materials. With INFINAM®, Evonik brings together more than 20 years of experience, highest quality standards and innovative strength to develop and manufacture custom-designed formulations for infinite 3D applications. INFINAM®—wherever infinity meets reality.

[www.evonik.com/additive-manufacturing](http://www.evonik.com/additive-manufacturing)

INFINAM®  ST

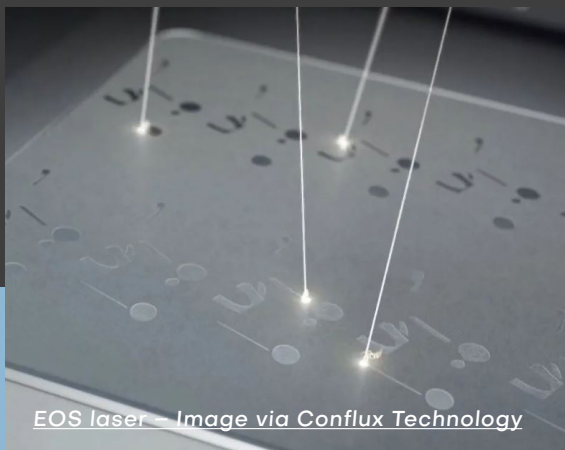


**CONFLUX TECHNOLOGY :  
RÉINVENTER LES ÉCHANGEURS DE  
CHALEUR À HAUTE PERFORMANCE  
AVEC LA FABRICATION ADDITIVE  
D'ABORD, PUIS APPLIQUER CETTE  
EXPERTISE À D'AUTRES DOMAINES.**



**Michael Fuller**

**J**e savais, dès le premier jour, que **Conflux Technology** était le genre d'entreprise que je suivrais de près dans ce secteur. Fondée en 2017, elle est sortie de nulle part l'année dernière en clôturant un tour [d'investissement de série A de 8,5 millions de dollars](#) australiens pour développer des échangeurs thermiques imprimés en 3D. À l'époque, je n'avais jamais parlé au fondateur et CEO **Michael Fuller**. La raison pour laquelle je savais que je suivrais cette entreprise est que son activité principale est axée sur une activité assez verticalement intégrée rendue possible par la fabrication additive, et pas n'importe quelle application, celle que la plupart des fabricants d'imprimantes 3D métal vont créer pour démontrer les capacités de leur technologie. Ça a l'air très simple, mais ça ne l'est pas. Lorsque j'ai échangé avec Fuller, je n'ai pu m'empêcher de sourire en écoutant son histoire et le parcours de son entreprise. Sans le savoir, il m'a donné trois raisons supplémentaires de suivre [Conflux](#), et en plus de ça, a discuté d'une idée fautive sur la fabrication additive d'échangeurs de chaleur.



EOS laser - Image via Conflux Technology

### Trois raisons qui peuvent susciter l'intérêt pour Conflux Technology

Je ne sais pas pour vous, mais je suis le genre de personne qui regarde au-delà de la qualité d'un produit dans les affaires. Pour que je reste fidèle à un produit ou à un service, je dois savoir quelque chose sur le fondateur ou les personnes qui se cachent derrière la marque, ou du moins il doit y avoir quelque chose que je respecte ou que j'apprécie dans la vision ou les valeurs de l'entreprise.

1- Une chose que j'ai apprise de Michael Fuller est que c'est un homme qui sait saisir les opportunités quand elles se présentent - et dans ce cas, comment les créer.

« Il y a eu plusieurs circonstances différentes qui ont conduit à un moment créatif «ah ha» pour moi, après une carrière de plus de 15 ans dans l'industrie du sport automobile européen, poursuivant mon rêve d'enfance de concevoir des voitures de course. Je me suis retrouvé en Australie pour des raisons familiales et j'avais une cheville cassée. J'ai donc sorti mon ordinateur portable et je me suis mis à dessiner », a-t-il expliqué à 3D ADEPT Media.

2- La deuxième chose dont vous vous rendrez compte, c'est qu'il apporte de la crédibilité à ce business.

« J'ai un passé d'ingénieur concepteur et j'ai été exposé à la fabrication additive dans l'industrie du sport automobile. J'ai également acquis une certaine expérience en matière de transfert de chaleur. De temps en temps, on a une bonne idée, et je voulais aller un peu plus loin pour voir si je pouvais obtenir une preuve de concept d'un point de vue de la faisabilité technique. À partir de là, j'ai décidé d'investir un peu d'argent pour fabriquer et tester quelque chose, et je me suis convaincu de continuer à aller de l'avant en termes de commercialisation. À ce moment-là, j'avais besoin de comprendre comment lancer et gérer une entreprise. J'ai donc fait tout un tas de recherches et je me suis mis directement au travail », il poursuit.

3- La troisième chose vous permet de comprendre la raison pour laquelle Conflux se concentre sur les échangeurs de chaleur et c'est « un peu plus qu'une noble cause ».

Si vous êtes novice dans ce domaine, sachez que la plupart de nos appareils électriques quotidiens (climatiseurs, moteurs de voitures, réfrigérateurs, etc.) fonctionnent grâce à des échangeurs de chaleur. Ces dispositifs permettent de transférer la chaleur entre une source et un fluide de travail. Or, la conception de ces dispositifs était autrefois un véritable défi en raison de la complexité à prendre en compte pour permettre aux fluides de se refroidir efficacement dans un espace aussi étroit.



Pour Fuller, « il est tellement omniprésent que la possibilité d'améliorer l'efficacité du transfert de chaleur signifie qu'il peut être transféré dans presque tous les secteurs que vous pouvez imaginer. Par exemple, l'amélioration de l'efficacité du transfert de chaleur peut permettre à votre avion de consommer moins de carburant pour le même vol. Vous pouvez y parvenir, que ce soit en réduisant le poids ou en réduisant directement la consommation de carburant. Dans le secteur automobile, si vous pouvez emballer des objets dans des espaces plus étroits, vous pouvez améliorer la traînée aérodynamique globale et donc l'efficacité. Dans le secteur de la microélectronique, si vous êtes en mesure d'évacuer plus efficacement la chaleur des puces, vous pouvez calculer davantage et plus rapidement. Cela a ensuite des répercussions - comme vous pouvez l'imaginer dans la recherche médicale et l'exploration spatiale - et dans toutes sortes de domaines. L'impact fondamental



de l'amélioration de l'efficacité du transfert de chaleur ne s'arrête pas là. »

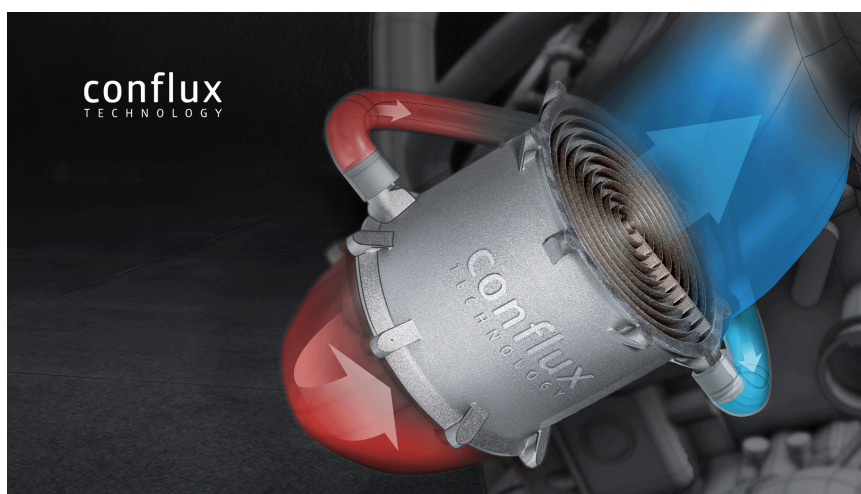
En outre, si on examine la manière dont les échangeurs de chaleur sont habituellement produits, on se rend rapidement compte que la fabrication traditionnelle peut impliquer une combinaison de brasage, de soudage, d'extrusion, d'usinage et de moulage. Dans l'un des processus manuels par exemple, s'il y a une défaillance entre l'un de ces joints de brasage, cela peut entraîner la défaillance de l'unité.

Même si notre objectif n'est pas de faire une sorte de comparaison entre les processus de fabrication traditionnels et les processus de FA, il est juste de dire que sur le plan pratique, la FA apporte un certain nombre d'avantages qu'il est difficile de ne pas mentionner : la capacité de fabriquer des échangeurs de chaleur en un seul composant, la capacité de fabriquer des objets plus petits, plus légers, plus efficacement... Cependant, tout cela s'accompagne de son propre lot de défis.

### De la conception à la production : à quoi ressemble le processus de fabrication chez Conflux.

Comme vous avez pu le comprendre à travers les lignes ci-dessus, la conception de dispositifs de transfert de chaleur a souvent été un défi en raison des exigences techniques soulevées par la **conduction, la convection et le rayonnement**. La chaleur est une énergie et, par conséquent, elle doit se conformer aux lois de la physique. Il est donc essentiel de comprendre les principes de la chaleur et du transfert de chaleur pour assurer le succès des projets dans ce domaine et pour résoudre les problèmes courants avant qu'ils ne se produisent. Inutile de dire que les défis peuvent augmenter quand on sait que la FA est la technologie de production qui sera utilisée.

« Nous avons notre propre série de familles de produits, qui sont créées sur la base d'études de marché et de la compréhension des points sensibles de nos clients, certains d'entre eux ayant besoin de produits relativement prêts à l'emploi, mais hautement configurables. La définition du problème est le point de départ de notre processus de conception. Nous passons ensuite à la sélection du concept ou à un processus d'idéation dans lequel nous avons des ingénieurs experts en calculs et en modélisation multiphysique. Nous avons également des ingénieurs de conception qui ont une longue expérience de la modélisation CAO. Nous exécutons nos simulations de modélisation physique sur un cluster de calcul interne à haute performance et utilisons les meilleurs outils tels que CATIA pour notre modélisation CAO. Ces équipes travaillent également avec les ingénieurs en charge des processus de FA qui se trouvent également en interne », explique le



CEO de Conflux.

En ce qui concerne la fabrication, Fuller rappelle tout d'abord que « l'échangeur de chaleur présente une géométrie complexe avec des parois très fines et des distances fines entre les éléments. Très souvent, il s'agit de géométries internes à l'appareil ». « Et donc, ce que nous devons faire, c'était de nous assurer que nous avions une technologie qui pouvait imprimer des structures très denses, si hautement denses que nous pouvions avoir des parois de type gaz séparant différents fluides de transfert de chaleur. Nous devons également nous assurer que nous pouvions éliminer tout matériau résiduel du processus de fabrication, qui pourrait être complètement retiré. Par conséquent, si vous envisagez la fusion par faisceau d'électrons, cela ne convient pas, car vous ne pouvez pas obtenir la finesse de parois dont vous avez besoin et vous ne pouvez pas retirer la poudre interne sans avoir recours à des processus assez élaborés. Avec le procédé de jet de liant, on obtient une densité plus faible. »

C'est la raison pour laquelle leurs études divergentes

sur les procédés de FA les ont amenés à choisir la **technologie de fusion à lit de poudre comme candidat à la production pour ces applications**. Dans la plupart des cas, ils peuvent atteindre le type de coefficients de transfert de chaleur dont ils ont besoin et également éliminer le matériau résiduel.

Cela dit, les treillis internes à parois minces peuvent augmenter la surface et les capacités de ces dispositifs. Parier sur une technologie comme le procédé LPBF peut conduire à la production de parois de 0,1 millimètre d'épaisseur ou moins. Pour y parvenir, il faut beaucoup de développement sur les paramètres de processus idéaux que la machine suivra. Et ce sont là quelques-uns des domaines clés sur lesquels se concentrent les ingénieurs en procédés de FA de Conflux.

Un autre avantage intéressant qui est très souvent mis en avant est la capacité de la technologie à fournir des pièces plus légères. Cet avantage est tellement commun à la plupart des applications de FA qu'il pourrait être facile de penser qu'il s'agit d'une nécessité absolue dans toutes les applications

« d'échangeurs de chaleur ». Fuller dit non à cette idée fausse :

« Beaucoup d'échangeurs de chaleur sont posés sur le sol et peuvent être montés sur de grandes dalles de béton. Les échangeurs de chaleur dans l'industrie de la production d'énergie, ou dans les énergies renouvelables à grande échelle, ou dans l'industrie nucléaire peuvent être aussi grands qu'une maison, les rendre plus petits dans ce cas peut être avantageux car il y a moins d'immobilier nécessaire, mais en termes de légèreté, ce ne sont pas toutes les applications d'échangeurs de chaleur. Si vous regardez les différentes industries, vous pouvez commencer à voir où la légèreté est importante : l'aérospatiale, l'automobile, en particulier dans le secteur des sports motorisés, et de plus en plus de véhicules électriques. Tout ce que vous pouvez faire pour réduire le poids se traduit par une efficacité énergétique fondamentale. Si vous avez moins de poids, vous avez besoin de moins d'énergie pour déplacer l'objet. Et, vous savez, les ordinateurs portables, s'ils peuvent être plus légers, c'est mieux. »

### Défis actuels, objectifs à court et à long terme.

Sur le papier, **Conflux Technology** a tout pour réussir. Les partenariats que l'entreprise a signés cette année avec [Dallara Autobili](#), et [GKN Additive](#), montrent que l'équipe est sur la bonne voie dans son aventure. Mais ce voyage aurait été sans saveur s'il n'y avait pas quelques embûches sur la route. En l'occurrence, malgré un investissement important en R&D pour faire correspondre la technologie à leur vision, **les défis actuels de l'entreprise sont désormais centrés sur la commercialisation.**

« L'industrialisation de la fabrication additive est encore assez naissante, et le coût des machines est encore très élevé. L'un des plus grands défis est de s'assurer que nous concevons et fabriquons des solutions pour les clients et les marchés qui sont dans la bonne position pour la maturité industrielle de la technologie habilitante que nous faisons », note Fuller.

Pour le représentant de Conflux, **la productivité augmente et les coûts diminuent**. Cependant, en ce qui concerne le niveau d'industrialisation, on n'en est pas encore à des centaines de milliers d'unités par an, et il n'y a donc pas encore ce genre d'applications qu'ils ont développées. [Ils travaillent constamment à abaisser l'asymptote du coût unitaire par machine.

À l'avenir, nous ne devrions pas être surpris de voir Conflux appliquer l'expertise qu'elle a acquise jusqu'à présent à d'autres domaines



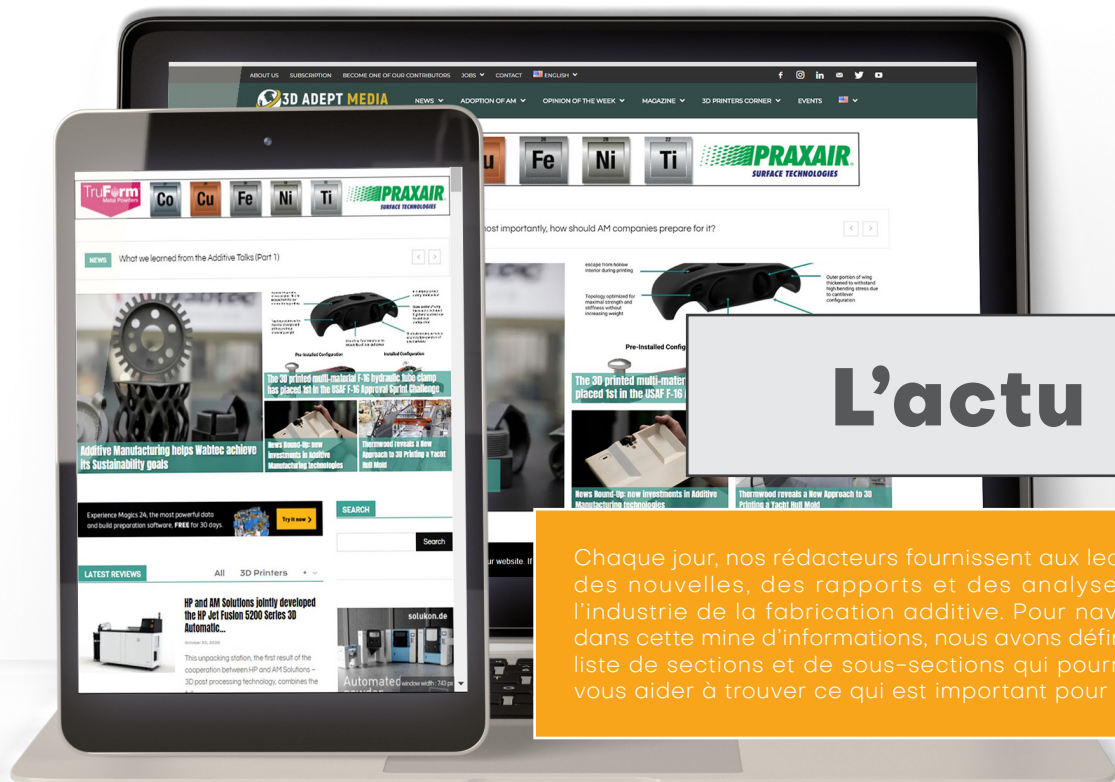
– une expertise qui se caractérise par « des parois minces et des géométries à haute résolution », selon les mots de Fuller. D'une certaine manière, c'est déjà le cas, puisque l'un de leurs clients qui a mené à bien un projet sur les échangeurs de chaleur avec l'équipe travaille maintenant avec eux à la construction de substrats pour les convertisseurs catalytiques dans la technologie de réduction des émissions. « Il y a donc un transfert d'expertise en matière de géométries haute résolution fabriquées de manière additive », commente Fuller.

Toutefois, à court terme, Conflux a d'autres projets en termes d'expansion et de localisation :

« Nous avons eu la chance d'avoir une première phase de l'entreprise installée à l'arrière de l'université Deakin à Waurn Ponds, Geelong. Ils ont une grande parcelle de terrain réservée à la fabrication avancée où les jeunes entreprises de fabrication avancée comme Conflux peuvent passer les premières années à s'installer,

ce que nous faisons depuis près de cinq ans [maintenant]. À la fin de l'année, nous déménagerons dans des installations plus grandes, dotées d'une plus grande capacité de production et d'essais. Nous sommes désormais présents sur le terrain dans nos principales régions clientes, avec des personnes basées au Japon qui couvrent le Japon, la Corée, l'Inde et la région Asie hors Australie. Nous avons une personne basée en Europe centrale, juste à côté de Munich, et nous sommes également sur le point d'avoir quelqu'un qui commence en Amérique du Nord. Nous sommes donc en train d'établir une empreinte mondiale. Cela nous permet d'être proches de nos clients, de partager les fuseaux horaires avec nos clients, ce qui est assez délicat depuis l'Australie. C'est vraiment une expansion sur tous les fronts, mais nos activités commerciales vont augmenter de manière significative dans les 12 à 18 mois à venir », le CEO de Conflux Technology conclut.





**AVEZ-VOUS DES INFORMATIONS RELATIVES À  
L'IMPRESSION 3D OU UN COMMUNIQUÉ DE PRESSE À PUBLIER?**

Envoyez un email à [contact@3dadept.com](mailto:contact@3dadept.com)



NEWS



RAPPORTS



PROMOTIONS



[contact@3dadept.com](mailto:contact@3dadept.com)

[www.3dadept.com](http://www.3dadept.com)

+32 (0)4 86 74 58 87

Rue Borrens 51,1050 Bruxelles - BELGIQUE

# Matériaux

**Kenan Boz,**

directeur technique, EPMA,  
Association européenne de la  
métallurgie des poudres

**Dr. Paul Davies,**

Directeur des solutions techniques,  
[Sandvik Additive](#)

## Poudres métalliques pour les applications de FA dans l'aérospatiale

Le séminaire de FA 2022 d'EPMA s'est tenu en mai sur le thème de la « FA dans l'aérospatiale ». Il a donné lieu à plus de 20 présentations et à de nombreuses discussions fructueuses. L'un des principaux résultats de ces discussions est qu'il existe un fort besoin d'une gamme plus large de matériaux dans l'aérospatiale avec des propriétés optimisées pour la FA. L'optimisation comprend le développement de processus spécifiques de production de poudres, une bonne caractérisation des poudres telles que la morphologie et les propriétés de fluidité, ainsi que l'optimisation du processus de FA lui-même.

**\*Les images de cet article ne sont disponibles qu'en anglais.\***

### PROCÉDÉS DE PRODUCTION DE POUDRE

Il existe de nombreuses méthodes différentes pour la production de poudre métallique. En général, quatre procédés principaux sont utilisés dans la pratique. Ce sont la réduction à l'état solide, l'électrolyse, la chimie et **l'atomisation**. Nous nous concentrerons sur l'atomisation dans cet article, car il s'agit de la méthode la plus pratique pour produire des poudres de fabrication additive en ce qui concerne la taille et la forme des particules et d'autres facteurs.

Dans la réduction à l'état solide, le minerai sélectionné est broyé, généralement mélangé à du carbone, et passé dans un four continu où la réduction du carbone et de l'oxygène a lieu [1]. Le résultat est un gâteau de métal spongieux qui est ensuite broyé et tamisé. La pureté de la poudre dépend de la pureté des matières premières et la morphologie est irrégulière. **L'électrolyse** est la méthode de dépôt du métal à l'état spongieux ou pulvérulent, suivie d'un lavage, d'un séchage, d'une réduction (réduction par l'hydrogène ou procédé carbonyle, utilisé pour extraire et purifier le nickel et le fer), d'un recuit et d'un broyage. En raison de ses coûts énergétiques élevés, l'électrolyse est généralement limitée aux poudres de grande valeur, comme les poudres de cuivre à haute conductivité. Les traitements chimiques des poudres impliquent la réduction des oxydes, la précipitation à partir de solutions et la décomposition thermique. Les poudres produites par des méthodes chimiques peuvent présenter une grande variation de propriétés tout en ayant une taille et une forme

de particules étroitement contrôlées.

L'atomisation est la méthode de formation de poudre par un jet de métal fondu qui se solidifie sous forme de fines particules. Le processus peut être réalisé au moyen d'air pressurisé, de gaz inerte, d'eau ou même sous vide, selon le type de matériau et son application. **Les trois principaux procédés d'atomisation** utilisés pour les poudres destinées à la FA dans les applications aérospatiales sont l'atomisation par plasma, l'atomisation par gaz inerte sous vide et l'atomisation par gaz inerte par fusion par induction.

### Atomisation du plasma

Le plasma est un mélange d'ions, d'électrons et de particules neutres à très haute température. Un gaz à haute pression passe à travers un champ électrostatique qui a une quantité suffisante de charge électronique et produira un arc de plasma. Les électrons et les molécules de gaz qui en résultent entrent en collision les uns avec les autres, ce qui peut conduire à la formation d'ions, d'atomes et de photons excités [3]. L'atomisation par plasma est un procédé inventé par **Pyrogenesis** au Canada en 1995 et maintenant largement adopté pour la production de poudres de titane et d'alliages de titane. La figure 1 (a) montre un schéma de procédé d'atomisation par plasma utilisant un arc à trois plasmas, avec un fil de titane comme matériau d'alimentation. L'arc à plasma est utilisé comme source de chaleur à haute enthalpie qui fait fondre et pulvérise le fil de titane fondu, ce qui donne une poudre de titane de forme ronde et de très grande pureté.



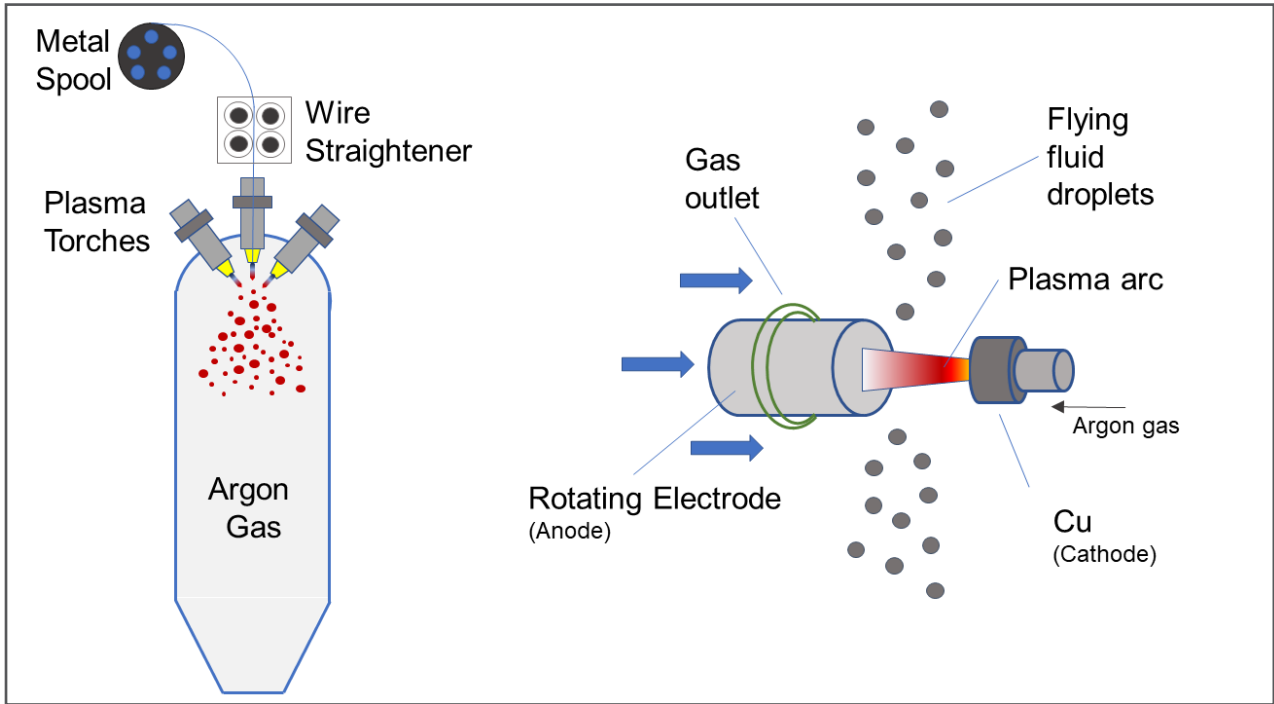


Figure 1 : (a) Atomisation par plasma (Source : Pyrogenesis) / (b) Atomisation par plasma à électrodes tournantes [7]

Un autre type de technologie plasma utilisé pour les applications d'atomisation des métaux est l'atomisation par procédé plasma à électrode rotative (figure 1b) où le matériau d'alimentation en forme de tige est mis en rotation à grande vitesse lorsque l'arc plasma d'argon ou d'azote fait fondre l'extrémité de la tige. Le métal liquide est projeté en gouttelettes qui se solidifient en particules sphériques en raison de la force centrifuge élevée de la rotation. Le résultat est généralement des particules grossières.

**L'atomisation par gaz inerte sous vide**

Dans une atomisation typique sous gaz inerte

(inert gas atomisation = IGA), le métal liquide est fragmenté par un gaz inerte sous pression, tel que l'argon ou l'azote, afin d'obtenir une protection contre l'oxydation, généralement de l'ordre de 100 à 2000 ppm, mais dépendant fortement du type d'alliage. Pour des teneurs en oxygène plus faibles, de l'ordre de 50 à 250 ppm, l'atomisation par gaz inerte sous vide (en anglais *vacuum inert gas atomisation* = **VIGA**) est appliquée lorsque la fusion et la coulée de l'alliage sont effectuées dans une chambre à vide, afin de permettre la production des alliages les plus sensibles à l'oxydation et les plus réactifs, tels que les alliages à base de Fe-, Ni- et Co contenant de l'Al, du Ti et des terres rares (Figure 2).

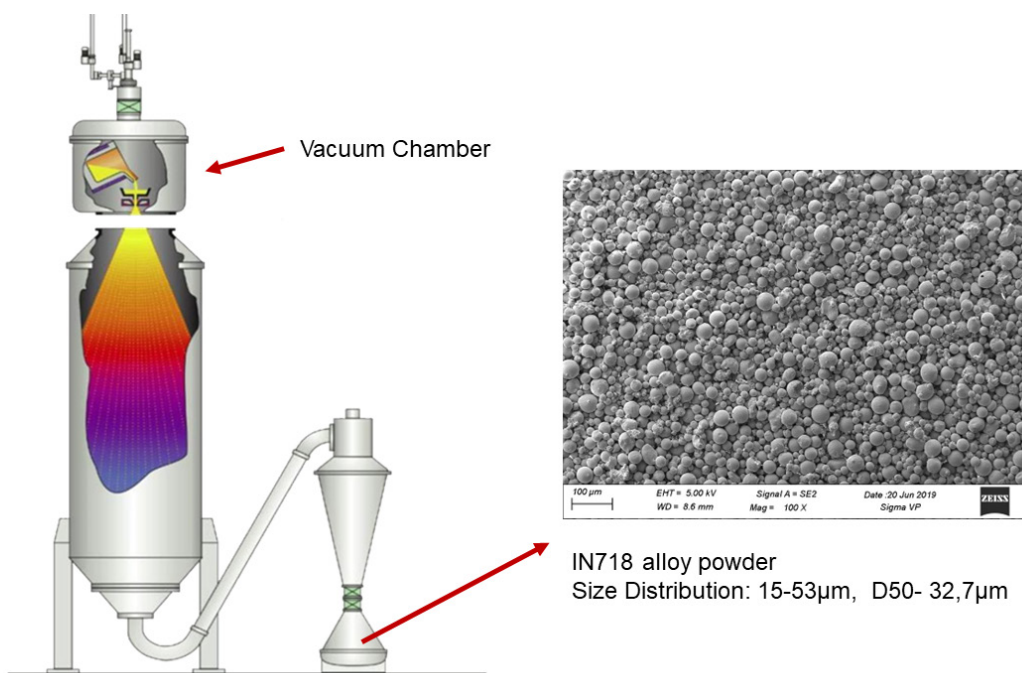


Figure 2 : Atomisation sous vide par gaz inerte (Source : ALD Vacuum Technologies (gauche), Sandvik (droite))

Le VIGA présente plusieurs avantages en termes de FA, notamment pour la fusion sur lit de poudre. Ces avantages sont les suivants

- Forme sphérique (bonnes caractéristiques d'écoulement)
- Faibles niveaux d'oxyde et d'impureté (propreté métallurgique, propriétés mécaniques améliorées)
- Densité élevée de plus de 65% (propriétés de couches uniformes)

Les superalliages tels que l'IN718, les aciers maraging et les aciers inoxydables duplex sont les alliages les plus couramment utilisés dans les systèmes VIGA pour la production de poudre destinée aux applications AM. Le système VIGA a été mis au point dans les années 50, lorsqu'on a cherché à explorer les avantages potentiels de la solidification rapide pour permettre la production de superalliages plus fortement alliés pour les applications aérospatiales et de défense [4].

**L'atomisation par gaz inerte par fusion par induction.**

Il s'agit d'un procédé d'atomisation de gaz «sans céramique» dans lequel le flux de fusion n'est pas fourni par un panier de coulée et une buse, mais par la fusion goutte à goutte d'une barre solide

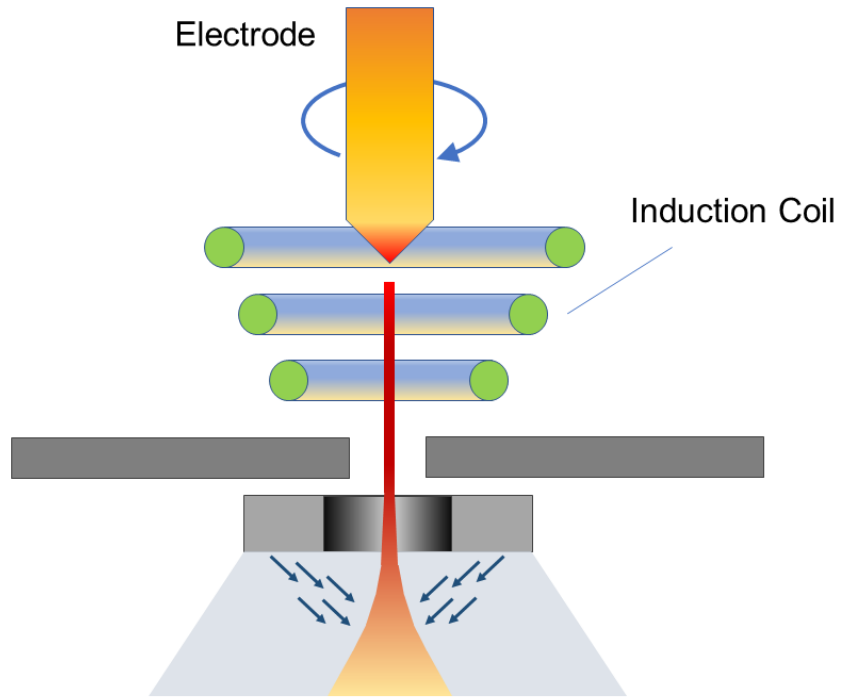


Figure 3 : fusion par induction avec électrode et atomisation par gaz inerte (Source : ALD Vacuum Technologies)

(l'électrode) qui est doucement tournée pour égaliser le processus de fusion autour du bord de la barre. La bobine d'induction profilée, qui fonctionne généralement à très haute fréquence (50 kHz, par exemple) pour éviter les forces magnétohydrodynamiques excessives, fait fondre le bord de

la barre en une forme conique et le flux de gouttes de métal liquide qui en résulte tombe dans une buse d'atomisation de gaz à chute libre, comme le montre la figure 3. La bobine de cuivre refroidie par eau est elle-même fabriquée par FA en raison de sa conception unique en forme de spirale en trois dimensions.

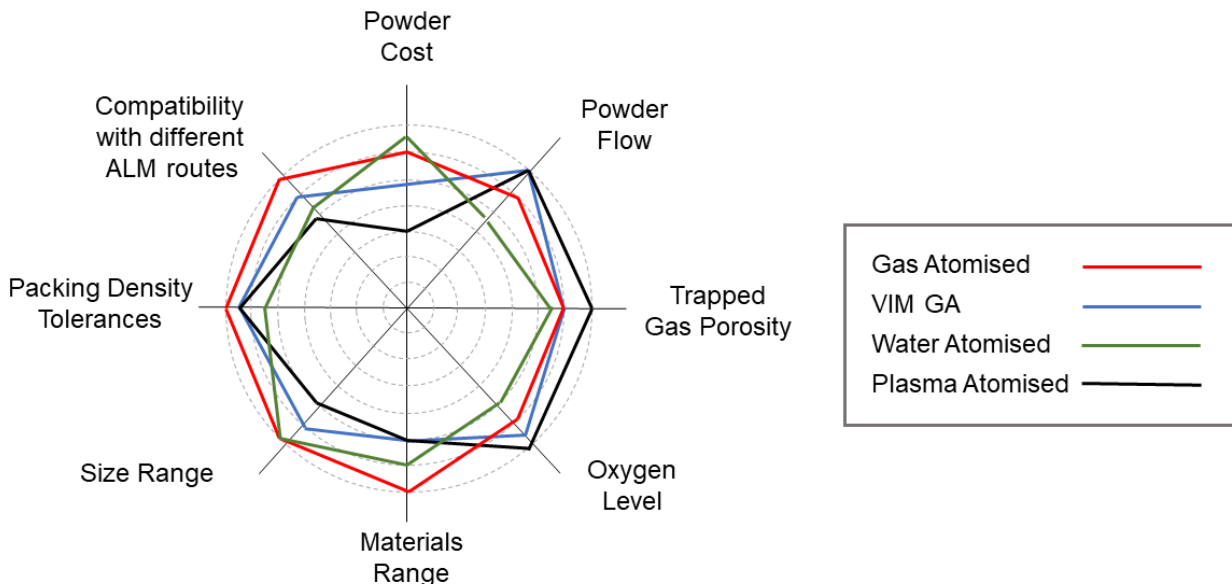


Figure 4 : Comparaison des différents types de poudre en termes de processus de production (Source : EPMA)

Le procédé EIGA est largement utilisé pour les alliages de titane, car le Ti attaque tous les matériaux possibles des buses en céramique. L'EIGA souffre du fait que l'emplacement du flux est mal défini et que la vitesse de fusion est plutôt lente, typiquement 10-30 kg h-1. Cela conduit à une consommation élevée de gaz par kilogramme de poudre.

Pour comparer ces différentes méthodes de production de poudre, **voici un tableau araignée en termes de coût, de taille et de gamme de matériaux, de niveau d'oxygène et de caractéristiques du flux.**



## OPTIMISATION POUR LA FABRICATION ADDITIVE

Certains attributs des poudres doivent être optimisés afin d'être utilisés en douceur dans la fabrication additive. Il s'agit notamment de :

- La forme de la poudre (Morphologie)
- Distribution de la taille des particules
- Consistance du lot
- Humidité relative
- Forme de la poudre (Morphologie)

La forme sphérique est la morphologie optimale

pour les poudres métalliques dans la FA car elle favorise de bonnes caractéristiques d'écoulement. La forme sphérique augmente également la densité du paquet et les propriétés de couche uniforme qui sont une condition préalable pour le processus de FA. Les satellites sont particulièrement évités en FA car ils nuisent à la fluidité.

### Distribution de la taille des particules

Chaque procédé de métallurgie des poudres a sa propre gamme de distribution de la taille des particules pour les poudres métalliques. Par exemple, le moulage par injection de métaux (MIM) nécessite des particules fines d'un diamètre inférieur à 22  $\mu$ , la médiane (D50) étant de 10  $\mu$ .

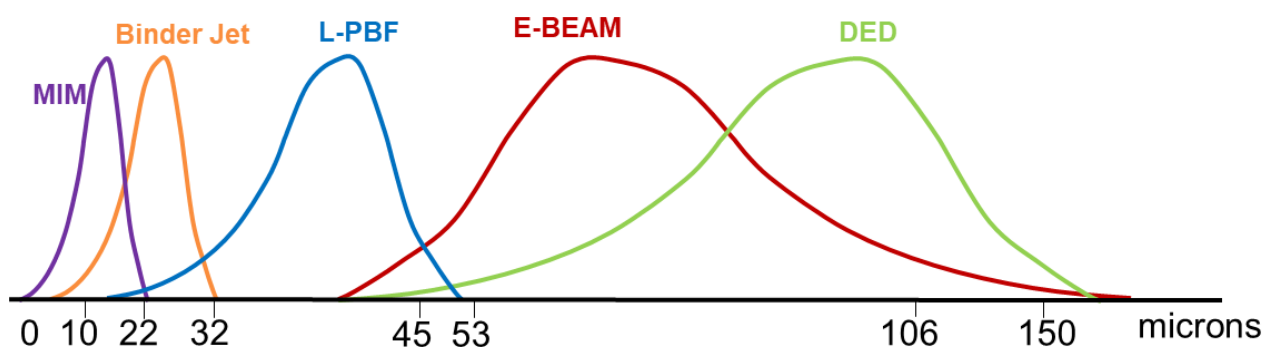


Figure 5 : Distribution de la taille des particules pour différentes techniques de fabrication additive.

Pour la fabrication additive, la distribution granulométrique pratique dépend du procédé (figure 5). En général, nous pouvons classer la distribution granulométrique des poudres métalliques en fines ( $<30 \mu$ ), moyennes ( $15-53 \mu$ ) et grossières ( $63-200 \mu$ ). Même s'il peut y avoir des variations, il est possible de dire que les particules de taille moyenne sont préférées dans les procédés de FA.

### Cohérence des lots

Les poudres métalliques sont produites par lots, ce qui peut entraîner des incohérences physiques et chimiques qui se traduisent par des variations

des propriétés des matériaux. En termes de caractéristiques des poudres métalliques pour la fabrication additive, il est important d'assurer un garnissage cohérent du lit de poudre et un débit constant, spécifiquement pour le procédé de FA utilisé.

### Humidité relative

L'impact de l'humidité sur la fluidité et la capacité d'étalement est préjudiciable en termes de fabrication additive. L'effet de l'humidité sur la fluidité dépend du type de matériau. Les poudres d'alliage d'aluminium (AlSi10Mg et Scalmalloy) sont particulièrement affectées par rapport à d'autres

matériaux tels que l'IN718 et le Ti6Al4V en cas d'augmentation de l'humidité relative [5]. Même si le niveau atteint n'est pas préoccupant, la poudre humide entraîne également une augmentation de la teneur en hydrogène et en oxygène dans le matériau construit. La teneur en azote n'est généralement pas affectée.

Le tableau ci-dessous récapitule les principales caractéristiques des poudres avec leurs méthodes de mesure et les normes correspondantes.

Characteristics	Effects on AM	Common Detection Methods	Associated Test Standards
<b>Chemical Composition</b>	Differences in chemical composition will influence the final part properties. Compliance with existing material standards pertaining to different industrial applications is necessary	Inductively coupled plasma, optical emission spectroscopy, X-ray fluorescence	ASTM E1019, ASTM E1409, ASTM E2465,
<b>Particle Size Distribution (PSD)</b>	The minimum layer thickness that can be built in AM is a function of powder particle size. The range of PSD influences the energy requirement and the packing bed density	Laser diffraction and sieve analysis	ASTM B214, ASTM B215, ASTM B822, ISO 4497, ISO 13320
<b>Flowability</b>	Influences the homogeneous distribution of powder bed. Flowability will be poor for powder batches containing a large proportion of smaller particles less than 6 microns	Hall flowmeter, Carney flowmeter, powder rheometry	ASTM B213, ASTM B855, ASTM B964,
<b>Density</b>	Effective packing of powder is required to ensure minimum porosity in the final part. Packing density has a significant effect on the thermal conductivity of the powder bed	Hall flowmeter, Carney flowmeter, Scott volumeter, gas pycnometer	ASTM B212, ASTM B417, ASTM B527, ASTM B923,
<b>Powder Morphology</b>	Influences homogeneous distribution of powder and the packing density. Powders with spherical shapes that spread easily in the powder bed are required for AM	Scanning Electron Microscopy (SEM)	ISO/ASTM 52907
<b>Microstructure</b>	Important to understand the grain morphology of the powder and to correlate it with microstructural characteristics of the final part	Optical microscopy or SEM	ISO 13322-1/13322-2
<b>Thermal Conductivity</b>	An important Thermo-physical property of the metal powder which affects the consolidation behaviour of powder	Guarded hot plate method	ASTM E1447, ISO 8302
<b>Humidity</b>	Poor processability of powder. Mainly introduced during handling, transportation, and storage. Causes porosity and uptake of oxygen in the final component.	Relative humidity sensor; Loss on drying	ISO/ASTM 52913-1 (Under Development)

Tableau 1 : Principales caractéristiques des poudres et leur importance dans les procédés de FA [8]

## POUDRES D'ALLIAGES POUR L'AÉROSPATIALE

Les principaux avantages de la fabrication additive métal dans les applications aérospatiales sont une réduction significative des coûts et des délais, l'utilisation de nouveaux matériaux, la réduction de la masse des composants grâce à des conceptions très efficaces et légères, et la consolidation de composants multiples pour l'amélioration des performances ou la gestion des risques. À titre d'exemple, on peut citer **l'utilisation de dispositifs de refroidissement interne dans les composants soumis à une charge thermique ou l'élimination des processus d'assemblage traditionnels**. Ces possibilités sont appliquées commercialement dans une série d'applications aérospatiales de premier plan, notamment les moteurs de fusée à combustible liquide, les réservoirs de propergol, les composants de satellite, les échangeurs de chaleur, les turbomachines, les vannes et le maintien des systèmes existants [6]. La figure 6 montre divers cas d'application de la FA dans l'aérospatiale.

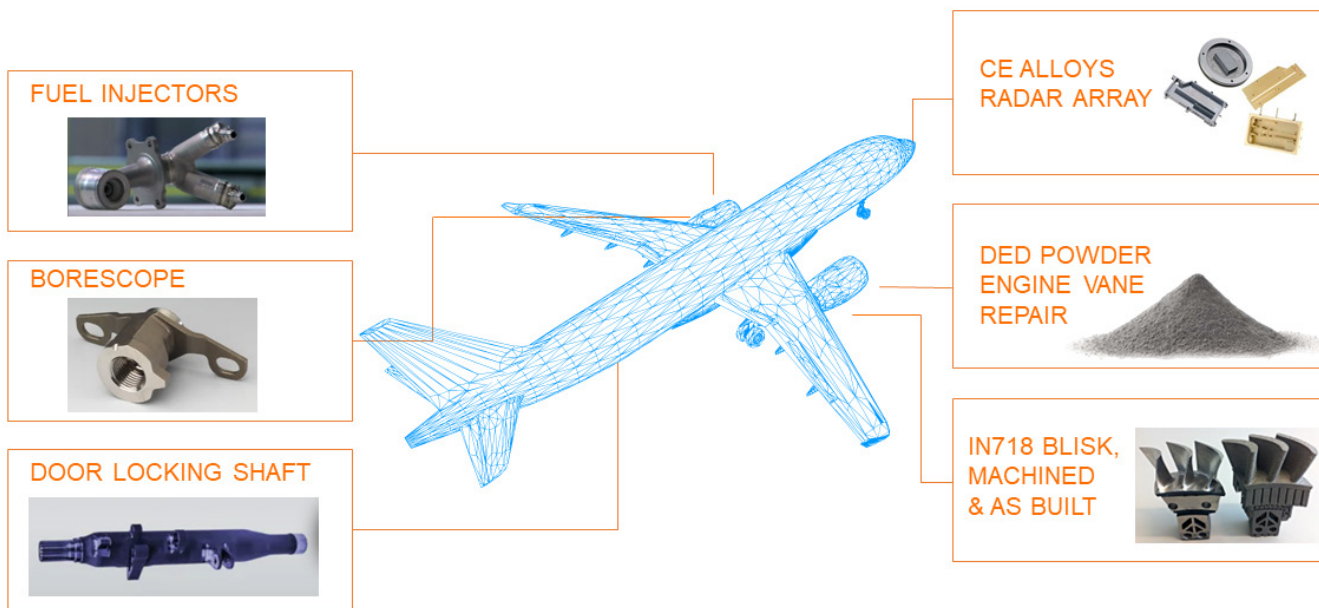


Figure 6 : Cas d'application de la FA dans un avion de ligne typique (Source : Sandvik)



Dans cet article, trois grands types d'alliages issus de différents procédés de production de poudres seront examinés du point de vue de leurs propriétés mécaniques et métallurgiques. Ces trois alliages font partie des alliages les plus couramment utilisés dans la fabrication additive pour l'aérospatiale. Ces alliages sont **l'Inconel 718**, **l'Hastelloy H-X** et **le Ti6Al4V**.

### Inconel 718

Il s'agit d'un superalliage à base de nickel traité

thermiquement pour la FA. La poudre d'Inconel 718 peut être produite en utilisant un procédé d'atomisation sous gaz inerte sans vide, mais pour de meilleures performances et propriétés mécaniques, le **procédé VIGA est préféré**. Il présente une résistance mécanique élevée associée à une grande résistance à la corrosion. Les propriétés mécaniques sont particulièrement intéressantes à haute température (jusqu'à 650 °C). La figure 7 montre une poudre d'Inconel 718 typique avec ses images microstructurales telles qu'elles sont produites par IGA et VIGA.

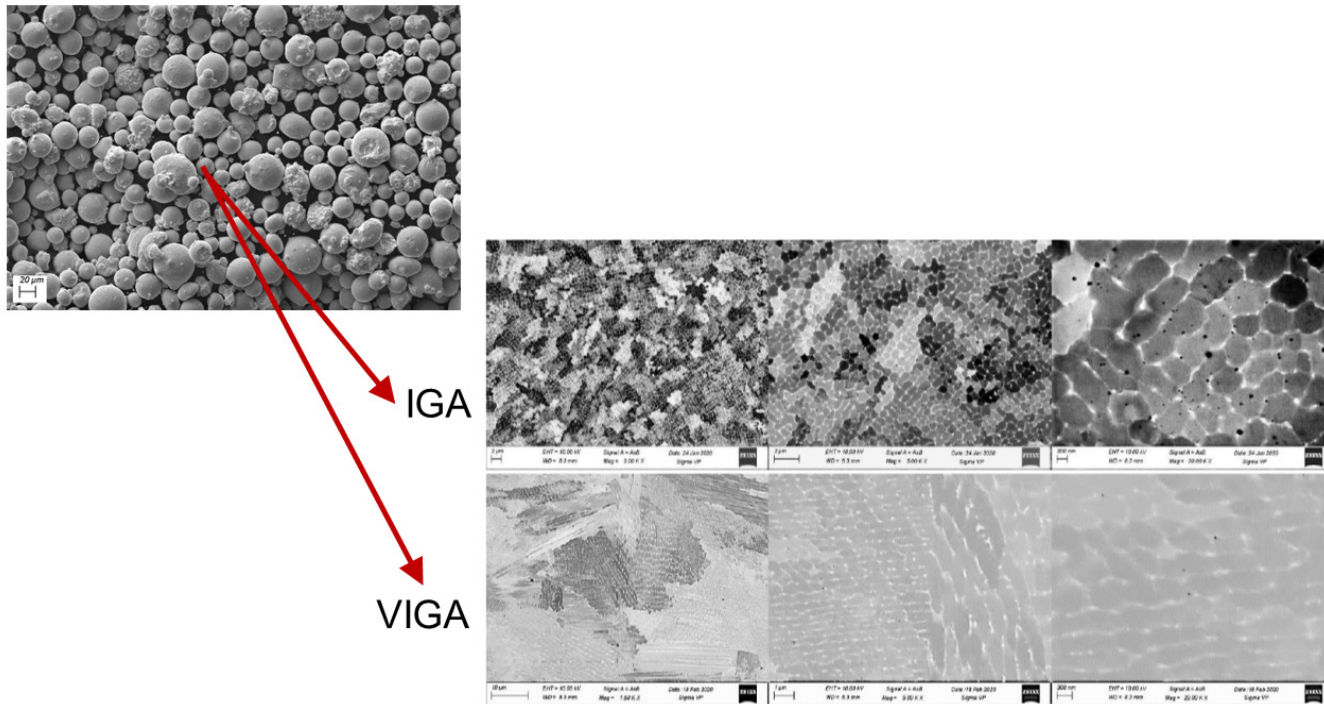


Figure 7 : Microstructure de l'Inconel 718 telle que fabriquée (Source : Sandvik).

Les propriétés mécaniques du matériau L-PBF basé sur la poudre IGA sont comparables à celles de la poudre VIGA. Pour les conditions de recuit de mise en solution et de vieillissement, les valeurs de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction sont indiquées dans la figure 8 par rapport à la température ambiante et à 650°C. En termes d'allongement, le matériau VIGA à 20°C (22%) est supérieur au matériau IGA (19%), mais la différence s'inverse à haute température. La résistance à l'impact du matériau VIGA (29 joules) est supérieure à celle du matériau IGA (17 joules) dans le sens vertical, mais similaire dans le sens horizontal (~16 joules). Les performances en matière de fatigue et de fluage de la poudre VIGA sont probablement supérieures à celles de la poudre IGA.

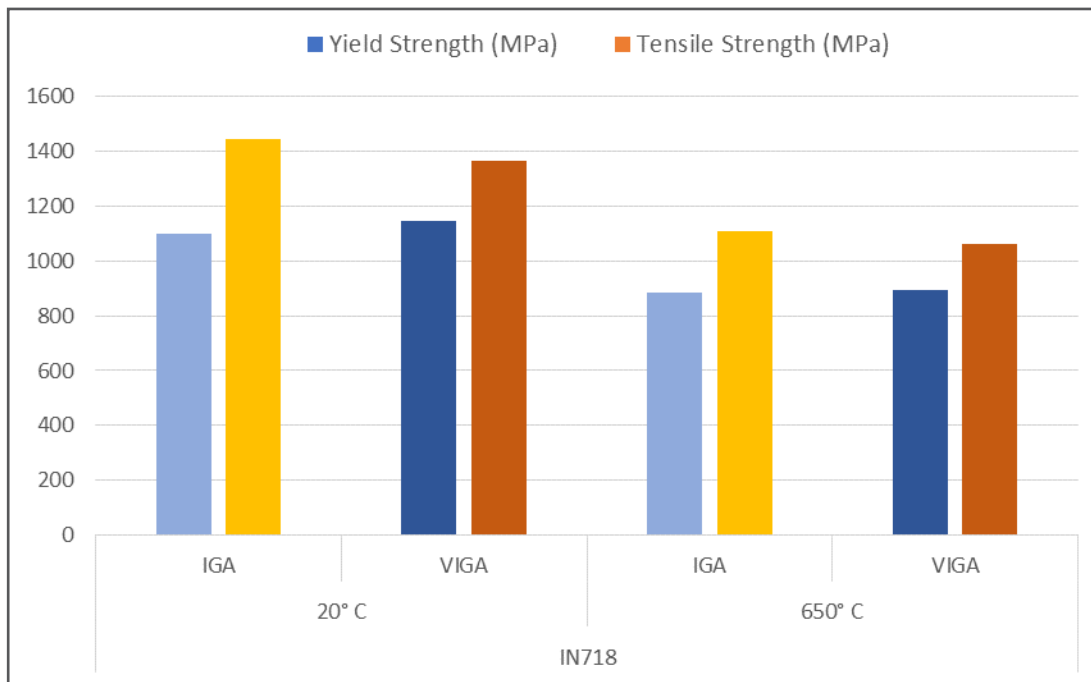


Figure 8 : Propriétés mécaniques de l'Inconel 718 dans la direction verticale (recuit de mise en solution et vieillissement).

**Alliage H-X**

L'alliage H-X, ou Hastelloy-X, est un alliage nickel-chrome-fer-molybdène haute température présentant une bonne résistance à l'oxydation et une bonne solidité. Il est utilisé pour des composants tels que les chambres de combustion, les postcombustions et les tuyaux d'échappement des moteurs à turbine à gaz des avions et des véhicules terrestres, les ventilateurs, les foyers à rouleaux et les éléments de support des fours industriels, ainsi que dans l'ingénierie nucléaire. Dans le cas de la FA, des fissures dans la microstructure peuvent être observées si les paramètres du processus et la composition ne sont pas optimisés. Ces formations de fissures sont souvent dues à la présence de manganèse et de silicium (Figure 9).

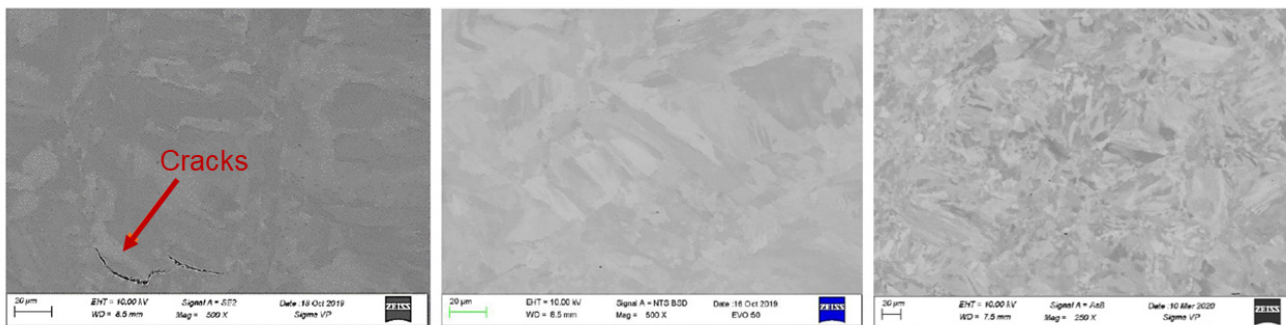


Figure 9 : Microstructure de l'alliage H-X, tel que construit – composition standard IGA (gauche), composition optimisée IGA (milieu), composition optimisée VIGA (droite) (Source : Sandvik)

En termes de propriétés mécaniques, la composition optimisée réduit considérablement la présence de fissures. L'allongement est comparable entre les poudres IGA et VIGA, autour de 33 %, et il est amélioré par le traitement thermique. Les poudres IGA et VIGA permettent d'obtenir une résistance élevée à l'impact et la poudre VIGA présente une bonne performance à haute température pour une résistance à 850 °C (Figure 10).

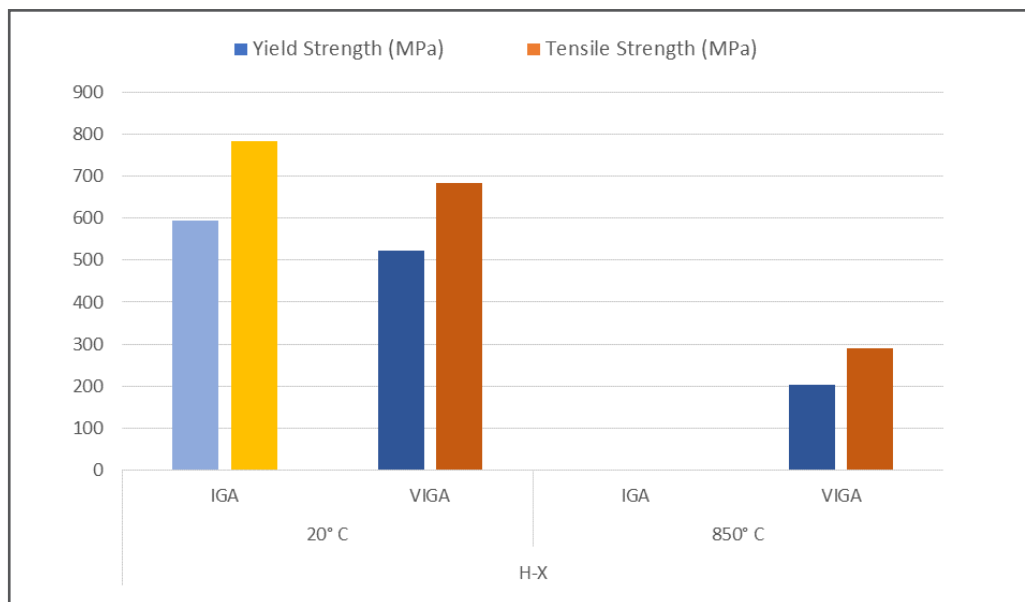


Figure 10 : Propriétés mécaniques de l'alliage H-X dans le sens vertical (Source : Sandvik)

**Ti6Al4V**

Le Ti6Al4V est un alliage de titane à haute résistance, faible densité, haute ténacité à la rupture, excellente résistance à la corrosion et biocompatibilité supérieure. L'aspect le plus important du titane à prendre en compte est qu'il attaque et se combine directement avec de nombreux non-métaux, tels que l'hydrogène, les halogènes, l'azote, le carbone, le bore, le silicium et le soufre à des températures élevées. Par conséquent, l'EIGA et l'atomisation au plasma sont des méthodes de production de poudre appropriées pour les alliages de titane où tout contact pendant les phases de fusion et de pulvérisation de l'atomisation est éliminé. En ce qui concerne la taille des particules, la fluidité, les niveaux de teneur en oxygène et en azote, les deux procédés présentent des valeurs similaires. (Tableau 2)

Powder type	Flow time 50g (s)	Size by laser (µm)	O (ppm)	N (ppm)
EIGA	38	d <sub>10</sub> =19.4 d <sub>50</sub> =33.1 d <sub>90</sub> =50.8	1090	165
PLASMA	30	d <sub>10</sub> =21.7 d <sub>50</sub> =34.0 d <sub>90</sub> =45.4	1100	100

Tableau 2 : Caractéristiques de la poudre de TiAl64V sous différents procédés de production (Source : Sandvik)



Les poudres atomisées par plasma et de type EIGA présentent des valeurs de limite d'élasticité similaires. La résistance à l'impact de la poudre EIGA est plus élevée que celle de la poudre atomisée par plasma et elle est améliorée en particulier par le **HIP (Figure 11)**. L'allongement est d'environ 15% et augmente légèrement en cas d'augmentation de l'épaisseur de la couche. Cela peut présenter l'avantage de réduire le temps de production mais souffre d'une rugosité de surface plus élevée.

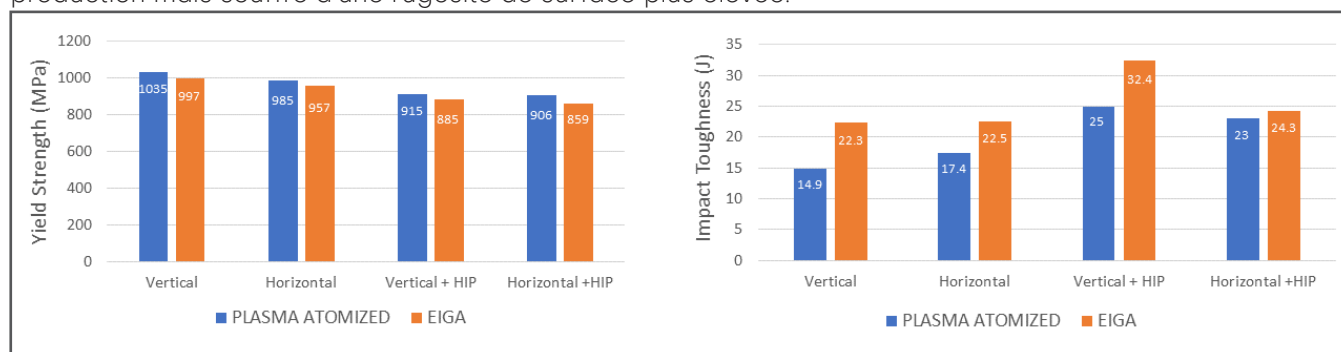


Figure 11 : Propriétés mécaniques du Ti6Al4V atomisé par plasma et de type EIGA à 30µ (Source : Sandvik)

## CONCLUSIONS

Certains procédés d'atomisation de gaz ont introduit une technologie propre de fusion par induction optimisée pour la FA en termes de plages de tailles de poudre, de compositions modifiées et de paramètres de processus. Aujourd'hui, de nombreux types de poudres de FA sont disponibles sur le marché pour les applications aérospatiales, **mais il reste encore beaucoup de chemin à parcourir pour développer de nouveaux alliages aux propriétés spécifiques optimisées pour de meilleures performances, une structure légère et des cycles de vie plus longs**. La recherche et le développement scientifiques sont importants pour réaliser de tels progrès qui mènent à une application industrielle dans un délai très court. Le congrès [WorldPM 2022](#), qui se tiendra à Lyon-France en octobre prochain, sera le principal point de rencontre des experts de l'industrie, des chercheurs et des universitaires travaillant sur la FA. L'aérospatiale sera l'un des sujets les plus brûlants des sessions techniques, des *Industry Corners* et des *Special Interest Seminars* qui se tiendront pendant le congrès et qui devront être suivis par toutes les parties concernées de l'industrie et du monde universitaire.

### Références (Sources disponibles en anglais)

1. The Metal Powder Industries Federation, "Making Metal Powder", [www.mpif.org/IntrotoPM/MakingMetalPowder.aspx](http://www.mpif.org/IntrotoPM/MakingMetalPowder.aspx)
2. J.J. Dunkley, "Metal Powder Atomisation Methods for Modern Manufacturing", Johnson Matthey Technol. Rev., 2019, 63, (3), 226–232
3. Ario Sunar Baskoro, Sugeng Supriadi, and Dharmanto, "Review on Plasma Atomizer Technology for Metal Powder", MATEC Web of Conferences 269, 05004 (2019), "ASM Handbook: Powder Metallurgy", eds.
4. P. K. Samal and J. W. Newkirk, Vol. 7, ASM International, Materials Park, USA, 2015, 907 pp
5. Pelle Mellin et al, "Moisture in Metal Powder and Its Implication for Processability in L-PBF and Elsewhere" Berg Huettenmaenn Monatsh (2021), 166:33–39, DOI 10.1007/s00501-020-01070-2
6. Byron Blakey-Milner et al, "Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A Review", Materials & Design 209 (2021) 110008
7. Yufan Zhao et al, "Centrifugal granulation behavior in metallic powder fabrication by plasma rotating electrode process", [www.nature.com/scientificreports](http://www.nature.com/scientificreports), October 2020
8. Alexander Liu, Rafi Khalid, "Metal Powder Characterisation: Standards and test methods for consistent quality in AM", Metal AM Vol. 8 No. 1, Spring 2022

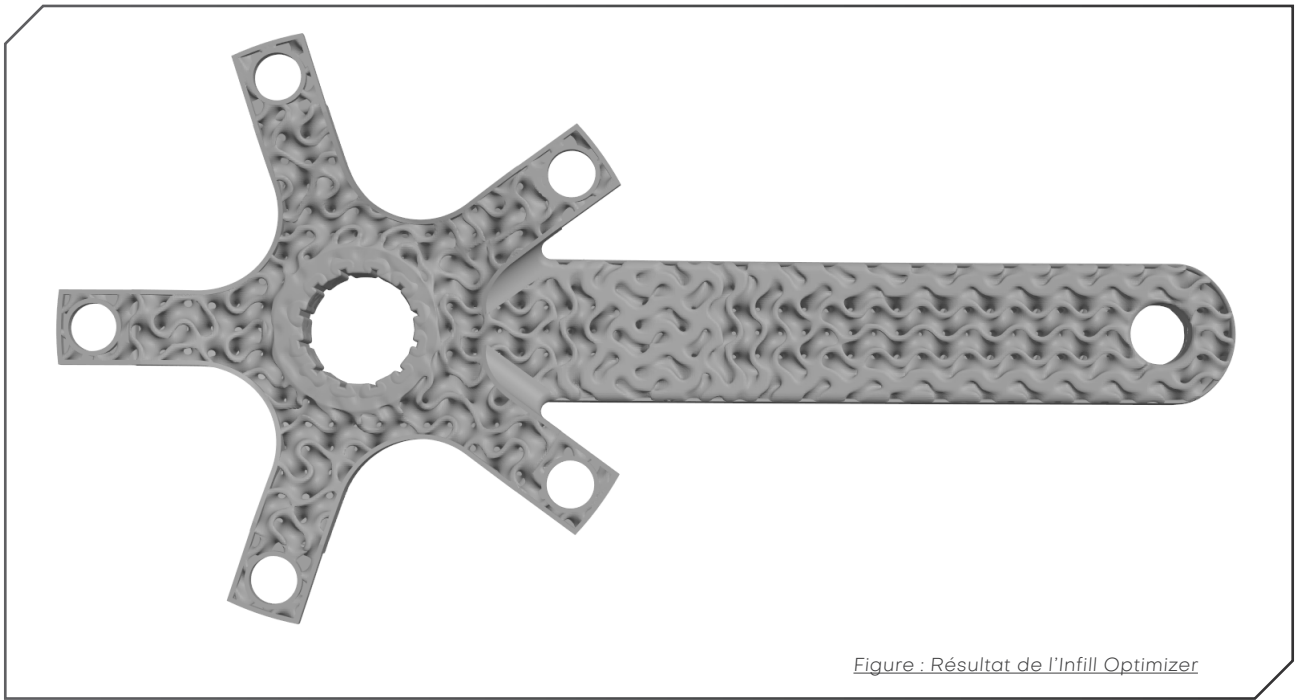


Figure : Résultat de l'Infill Optimizer

# LOGICIELS

## 4 STRATÉGIES LOGICIELLES QUI PEUVENT ÊTRE EXPLORÉES POUR PERMETTRE L'ALLÈGEMENT AVEC LA FABRICATION ADDITIVE.

Combien de fois avez-vous vu le mot «allègement» utilisé à côté de «fabrication additive» ? Si va au-delà du buzz que cette combinaison de mots pourrait créer, on se rend compte que ce concept de fabrication implique des équations de valeur pour des types de pièces spécifiques, ce qui peut conduire à des améliorations sur des produits existants, à de nouveaux modèles commerciaux et à de nouveaux marchés.

«Faire plus, avec moins» a toujours été (et, d'une certaine manière, reste) l'objectif principal de l'allègement - un concept de fabrication qui exige de tirer parti d'un large éventail de méthodes pour que les pièces et produits industriels soient plus légers tout en conservant ou en améliorant leurs caractéristiques techniques et mécaniques.

L'intérêt pour ce concept de fabrication a commencé avec les entreprises aérospatiales qui cherchaient à réduire la taille, le nombre et le poids des pièces. À l'époque, l'idée était assez simple : chaque gramme enlevé du poids d'un avion équivaut à une réduction de carburant. Dans un autre domaine, ils ont constaté que la réduction de la taille des pièces des satellites pouvait offrir plus d'espace pour ajouter une batterie, augmentant ainsi la durée de séjour du satellite dans l'espace. Au fil du temps, les équipes de R&D ont exploré les avantages de ce concept de FA pour d'autres applications et industries, et ont découvert que les avantages en termes de matériaux, de performances, de coûts et de délais de fabrication peuvent également être d'une importance capitale.

L'article ci-dessous a pour but de comprendre les **bases entourant « l'allègement des pièces fabriquées de manière additive »**. En mettant l'accent sur la perspective du logiciel, l'article discute des facteurs décisifs qui conduisent à l'allègement des pièces, ainsi que quelques stratégies logicielles qui peuvent être explorées dans ce processus.

### Les facteurs décisifs qui peuvent conduire à l'allègement des pièces

Notons que l'allègement est avant tout souvent compris comme le retrait de matière d'un assemblage ou d'une pièce pour en réduire le poids. En théorie, c'est exactement ce qui se passe. C'est aussi la raison pour laquelle, l'accent est généralement mis sur la «réduction des matériaux» et/ou le remplacement de certains matériaux par d'autres matériaux plus légers ou pouvant apporter des gains supplémentaires.

« Il est possible de réduire le poids global d'une pièce en choisissant des matériaux ayant une résistance spécifique plus élevée. Par exemple, si nous comparons un acier inoxydable, un alliage d'aluminium et un alliage de titane, la résistance spécifique plus élevée de l'alliage de titane permettra d'utiliser moins de matériau pour atteindre le même niveau de performance », note **Rhushik MATROJA**, CEO et cofondateur de la société de logiciels **Cognitive Design Systems**.

Cet accent mis sur les «matériaux» a donc une incidence sur la conception de la pièce, qui doit refléter la manière dont les changements fondamentaux apportés à la conception permettent de réduire la consommation de matériaux et, en fin de compte, le temps de construction.

Cette nécessité de réduire le poids en utilisant le bon matériau est souvent abordée parallèlement à un autre problème urgent : les **déchets**. S'il suscite de



plus en plus de questions sur le caractère durable du processus de production, il soulève également un certain nombre de défis qui méritent d'être pris en compte au niveau de la conception. C'est en tout cas ce qu'explique Rhushik MATROJA :

« Étant donné que l'allègement de toute structure aura un impact direct sur la performance mécanique de la pièce, il doit être effectué en gardant à l'esprit la performance mécanique du matériau.

La fabricabilité est l'un des facteurs les plus influents de l'allègement. On peut avoir la conception théorique la plus légère et la plus performante, mais cette conception devient inutile si elle n'est pas fabricable.

Un autre facteur important est le coût de la pièce. Si la pièce allégée à l'aide de l'optimisation topologique n'est pas bien conçue, il y aura des coûts supplémentaires pour la suppression des structures de support excessives et pour le traitement de surface supplémentaire. D'autre part, l'impression de structures en treillis et de structures TPMS peut augmenter le temps d'impression, ce qui entraîne une augmentation du prix de la pièce. »

### Les stratégies logicielles au cœur de l'allègement

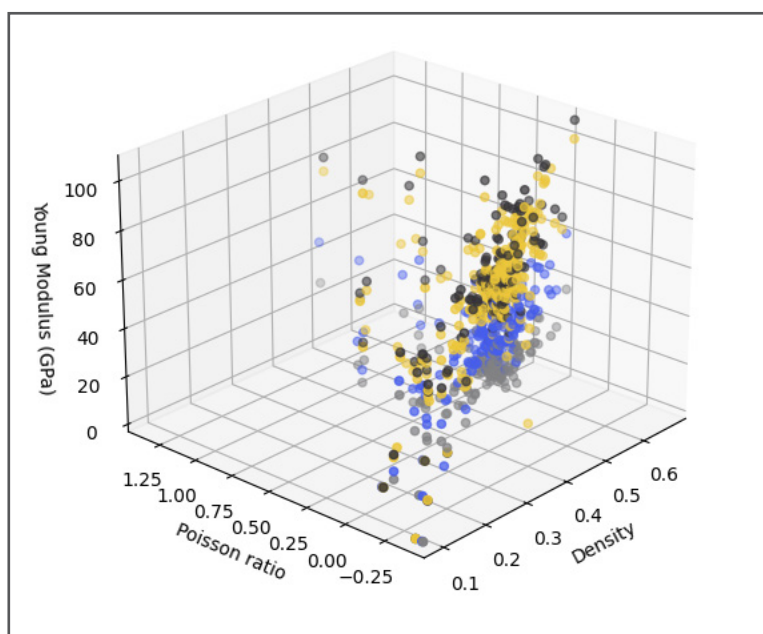
Cela fait deux décennies que les fabricants tirent parti de la fabrication additive, mais les progrès en matière d'allègement des pièces ne sont apparus que récemment, grâce à l'utilisation de

nouvelles stratégies logicielles conçues pour relever ce défi.

L'une des premières stratégies logicielles souvent explorées à ce niveau est **l'optimisation de la topologie**. La capacité d'optimiser la topologie des pièces en fonction d'objectifs de rigidité ou de résistance basés sur les méthodes des éléments finis (FEM) permet de concevoir des pièces légères de manière ciblée. Cette stratégie de conception optimise la disposition des matériaux dans un espace de conception donné, pour un ensemble donné de charges, de conditions limites et de contraintes.

### L'utilisation de structures de remplissage en treillis ou TPMS

est une autre méthode intéressante à explorer. Il s'agit d'hybrides de matériaux solides et d'espaces vides qui sont créés de telle sorte qu'ils dictent les propriétés mécaniques. L'utilisation de structures en treillis intelligentes peut aider à explorer des propriétés thermomécaniques intéressantes. « Les connaissances sur les performances de ce type de structures sont très importantes. Des processus de conception et de simulation sont nécessaires pour obtenir des informations sur les performances. Cognitive Design Systems a créé une grande base de données de ces méta-matériaux avec leurs propriétés mécaniques. Notre outil «Infill Optimizer», qui fait partie de notre logiciel de FA «Cognitive Additive», place intelligemment ces structures en fonction de la trajectoire des contraintes afin de réduire le poids total sans diminuer les performances mécaniques », explique Matroja. At volore dolecep taectaqui re ventistiae. Emquia cuptae es nat liquas eosandam idel int aciasped endam res



Légende : Les structures légères, telles que les treillis, apportent également des propriétés mécaniques supplémentaires telles que l'absorption des chocs. Dans l'image ci-dessus, vous pouvez voir de telles structures appliquées à la conception d'un casque d'escalade.

Selon Matroja, l'optimisation de la topologie convient généralement mieux aux technologies à base de poudre/résine, tandis que la stratégie de remplissage fonctionne mieux pour les procédés FFF ou DED.

La **consolidation des pièces** est une stratégie qui nécessite une expertise et une capacité solides pour rassembler plusieurs pièces en une seule. Si elle est bien conçue, la pièce peut offrir une meilleure fonctionnalité. Il y a quelques années, par exemple, Airbus Defence and Space et 3D Systems ont mis au point le premier filtre **radiofréquence (RF) imprimé en métal**, testé et validé pour une utilisation dans des satellites de télécommunication commerciaux. Les filtres RF sont traditionnellement conçus à l'aide d'éléments standard tels que des cavités rectangulaires et des sections de guide d'ondes avec des coudes

perpendiculaires, avec des formes et des connexions dictées par des processus standard tels que le fraisage et l'érosion par étincelage. Généralement, les cavités des filtres RF sont produites en usinant deux moitiés qui sont boulonnées ensemble, ce qui augmente le poids, ajoute des étapes d'assemblage et des contrôles de qualité supplémentaires. À l'aide du logiciel **CST MWS**, un outil de simulation électromagnétique en 3D, l'équipe de 3D Systems a développé une cavité super-ellipsoïdale déprimée pour canaliser les courants RF et rejeter les signaux hors bande. La conception a été guidée par la fonctionnalité pure, et non dictée par la fabricabilité, et a abouti à une pièce à construction unique plus rapide à produire, réduisant les coûts de production et le poids de 50 %.

Viennent ensuite les **Bord-côte conformes (Conformal**

**ribbing).** Cette technique est très répandue dans l'aérospatiale. Selon la société de logiciels [nTopology](#), qu'elles soient construites à partir de polymères, de métaux ou de composites, les nervures conformes visent à rendre les parois plus fines tout en améliorant la résistance au flambage.

Les nouvelles solutions logicielles basées sur l'intelligence artificielle permettent aux ingénieurs concepteurs de «programmer» des algorithmes afin qu'ils prennent en compte les différentes contraintes de ce qui peut (ou ne peut pas) être réalisé avec un type de procédé de fabrication spécifique. De cette façon, leurs conceptions évoluent et se développent en quelque chose qui peut facilement être fabriqué par FA.



*Casque d'escalade - Il s'agit d'un prototype que Cognitive Design Systems a développé avec OberAlp, une marque italienne de matériel de sport de montagne.*

## Réflexions finales

Le désir de tirer parti de toutes les capacités de la FA pour réduire les délais de commercialisation ou les coûts, incite les ingénieurs à développer des géométries de pièces alternatives, ce qui se traduit par des solutions techniques innovantes représentées dans les applications finales.

La vérité est que ce qui était autrefois considéré comme «léger» est désormais obsolète. Et cette tendance va se poursuivre, sans doute indéfiniment, car les solutions logicielles continuent d'évoluer.

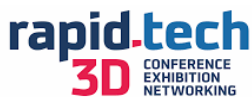
Notre média en ligne, c'est beaucoup plus que de simples informations quotidiennes. Restez connectés à l'industrie à travers notre newsletter et suivez-nous sur [LinkedIn](#), [Twitter](#) et [Facebook](#).





# Événements

## DISTRIBUTION



6<sup>th</sup> Additive Manufacturing Forum Berlin 2022



advanced manufacturing madrid22



AM Medical Days 2022 Berlin

# formnext



Additive Manufacturing for Aerospace & Space

ADDITIVE MANUFACTURING STRATEGIES



Vous pouvez récupérer votre exemplaire imprimé du AM Solutions catalogue 2022 lors des événements partenaires suivants :



**Rapid.Tech 3D – Conference + Exhibition,**

17-19 Mai 2022 | Allemagne



**Addit3D,** 13-17 Juin, Bilbao, Espagne



**Advanced Materials Show UK,** 29-30 Juin, NEC, Birmingham, UK



**Ceramics UK,** 29-30 Juin, NEC, Birmingham, UK



**Additive Manufacturing Forum,** 5-6 Juillet, Berlin, Allemagne



**World PM2022 Congress & Exhibition** | 9-13 Octobre 2022 | France



**Metal Madrid – part of Advanced Manufacturing Madrid**

19-20 Octobre 2022 | Espagne



**AM Medical Days**

19-20 Octobre 2022 | Allemagne



**Formnext**

15-18 Novembre 2022 | Allemagne



**7th Military Additive Manufacturing Summit**

Février 2023 | USA



**Additive Manufacturing for Aerospace and Space Conference**

Février 2023 | Allemagne



**Additive Manufacturing Strategies** | Q1 2023 – Date à confirmer – | USA



credit: Helene Cascarinod

## AM SHAPERS | COUPS DE CŒUR DE L'ÉTÉ | APPLICATIONS

### Biens de consommation : L'impression 3D est au cœur de leur activité

Il est facile de voir les lunettes, les chaussures et les vélos comme des applications de premier ordre dans l'industrie des produits destinés au grand public, mais il y en a bien d'autres... Et le plus intéressant ? c'est que parfois, les fondateurs n'ont pas toujours une formation d'ingénieur. Dans cet article dédié à nos « coups de cœur de l'été », nous faisons la lumière sur trois entreprises qui s'appuient sur l'impression 3D pour prospérer :

#### 1. Wyve, la planche de surf imprimée en 3D

Depuis plus d'un demi-siècle, les façonneurs de planches de surf découpent des planches à partir d'ébauches en mousse. Plusieurs entreprises cherchent aujourd'hui de nouvelles alternatives pour construire des planches qui réduisent la pollution environnementale. Pour la société française WYVE, l'impression 3D a été salutaire dans leur quête puisque l'entreprise s'appuie sur ce procédé pour concevoir et produire des planches de surf plus respectueuses de l'environnement. Le voyage a commencé avec **Léo, Sylvain** et **Mylène**, un groupe d'amis - ingénieurs de formation et passionnés de surf.

« En achetant des planches de surf traditionnelles,

la communauté des surfeurs soutient par inadvertance un processus qui utilise des matériaux pétrochimiques et génère des déchets toxiques », déclare [Wyve](#). « Que ce soit dans l'entrepôt du petit shaper local ou dans les célèbres usines californiennes, depuis 60 ans, le polyuréthane et le polyester polluent notre air et nos océans. »

#### Un modèle de fabrication et de distribution local

En tant qu'ingénieurs, la modélisation et l'optimisation numériques ont très tôt fait partie de leur formation, mais commencer par le prototypage de leurs premières planches de surf leur a permis d'acquérir une solide expertise en matière d'impression 3D. Au niveau de la fabrication, l'entreprise s'appuie sur le processus FDM pour imprimer ses noyaux hexagonaux à partir de PLA, un **plastique recyclable biosourcé** fabriqué à partir d'amidon de maïs fermenté. Le processus de fabrication se déroule en cinq étapes :

- Définition du contour adéquat de la planche de surf grâce au logiciel d'optimisation des données de l'entreprise, basé sur les connaissances, les mesures, les habitudes de surf et les objectifs des shapers.
- Optimisation du motif en nid d'abeille, grâce à la conception assistée par ordinateur (CAO), pour répondre à des critères de performance élevés.
- Impression 3D du noyau de votre planche de surf avec du bio-plastique. Pour limiter son profil d'émissions, l'entreprise s'engage à rassembler les matériaux et à fabriquer les planches sur une base locale.
- Vitrification du noyau creux imprimé en 3D avec de la fibre de verre et une résine biosourcée à 50 % (label ecoboard gold), avec une couche finale à chaud pour

le faire briller.

- Emballage écologique en carton pour un transport sûr et éco-responsable.

Jusqu'à présent, Wyve surfe bien sur la voie du succès puisqu'elle a récemment obtenu 1,1 million d'euros. Avec cette levée de fonds, l'équipe va poursuivre la R&D pour produire des planches performantes et éco-conçues en accord avec la professionnalisation et la démocratisation de la pratique ; développer sa micro-usine de fabrication locale en combinant le meilleur de l'artisanat et de la technologie ; accélérer son développement commercial et agrandir son équipe.

## 2. « L'avenir des bijoux »

«La vie nous emmène parfois dans des endroits inattendus. L'avenir n'est jamais gravé dans la pierre, ne l'oubliez pas». Ces mots de l'écrivain Erin Morgenstern pourraient s'appliquer à tant de parcours dans la vie de chacun, mais aujourd'hui, j'ai l'impression qu'ils incarnent vraiment le parcours de création de TFOJ. Nous avons entendu parler des sœurs Janine et Casey Melvin pour la première fois en 2018, alors qu'elles présentaient [une ligne de bijoux personnalisés imprimés en 3D](#) et BEZEL, une application mobile de commerce électronique - alors qu'en réalité, elles avaient suivi une formation pour devenir avocates.

« Nous n'avons jamais eu l'intention de devenir des entrepreneurs ou de créer notre propre entreprise », a déclaré **Casey Melvin** à 3D ADEPT Media. « En 2016, ma sœur et moi venions toutes deux de terminer notre première année de droit dans l'Ohio et, comme nous avions travaillé dans le droit pendant quelques années avant d'entrer à l'école de droit, nous voulions profiter de cet été comme de notre dernière opportunité avant que le monde réel ne frappe et que vous deviez commencer à étudier pour l'examen du barreau pour devenir un avocat agréé. Et vous devez commencer à trouver un emploi pour une fois que vous serez accrédité.

Donc ce premier été, on a décidé qu'on voulait étudier à l'étranger. Nous avons donc postulé et avons été acceptés dans un programme de droit comparé à Oxford, et c'était la première fois que nous étudions à l'étranger - ou que nous voyagions vraiment en dehors des États-Unis. Nous étions donc vraiment, vraiment excités par cette expérience. C'était l'été 2016 et le premier jour où nous avons atterri à Londres, avant de nous rendre à Oxford, c'était le jour du référendum sur le Brexit. C'était donc... le chaos absolu, et juste... un cours accéléré sur la géopolitique de la région. Nous avons donc fait quelques excursions, nous sommes allés à l'abbaye de Westminster et nous avons pu voir des choses très intéressantes en temps réel. »

De fil en aiguille, les sœurs se sont retrouvées à Majorque, en Espagne, à la recherche d'un souvenir qui les aiderait à se

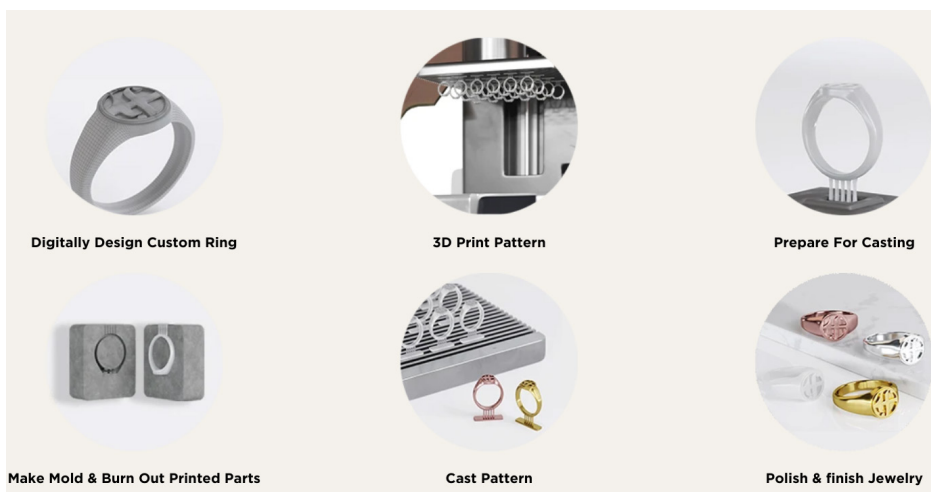


Casey Melvin on the right and Janine.

souvenir des liens qu'elles ont tissés au cours de ce voyage. Étant donné qu'elles étaient destinées à devenir avocates, un bijou standard semblait plus approprié, un bijou qui ne soit pas odieux et qu'elles pourraient facilement porter tous les jours. Il s'avère que la simple chevalière en or 14 carats qui a suscité l'intérêt de la sœur de Casey était trop grande pour elle - mais convenait parfaitement à Casey. Cette dernière a donc acheté la bague pour elle et, de retour dans l'Ohio, a commencé à faire des recherches pour trouver une chevalière en or uni similaire pour sa sœur. Heureusement, elle n'a rien trouvé, et ensemble, elles ont décidé de chercher d'autres moyens de donner vie à ce produit pour elle - et potentiellement pour des masses. C'est ainsi que **THEFUTUREOFJEWELRY** a vu le jour.

Aujourd'hui, la marque vise à simplifier le processus de création de bijoux - en le rendant plus facile, abordable et accessible à tous. Pour ce faire, ils ont créé une plateforme qui ne nécessite aucune compétence avancée pour créer des designs uniques, sélectionner un matériau, recevoir un devis instantané et faire livrer le produit à domicile. Comme vous pouvez le deviner, seule l'impression 3D peut être le candidat idéal pour la production de tels processus sur mesure.

## La conception et la fabrication de pièces uniques en argent sterling et en or 14 carats.





« THEFUTUREOFJEWELRY ne détient aucun stock physique, imprimant en 3D et coulant chaque pièce sur commande à partir d'un fichier 3D CAO de la bague générée algorithmiquement en arrière-plan dans 155 tailles de bague distinctes », nous a dit Casey Melvin.

L'application web interactive de conception de bagues en 3D fonctionne aussi bien sur un téléphone, une tablette qu'un ordinateur portable. Elle permet aux utilisateurs de concevoir et de fabriquer des bijoux **en argent sterling et en or 14K**. Des imprimantes 3D avancées basées sur la technologie DLP ainsi que des équipements de moulage sont au cœur du processus de fabrication. Selon la porte-parole de TFOJ, ce procédé d'impression 3D dans une résine de cire permet de fournir des impressions très détaillées et le meilleur état de surface. L'impression 3D sert à « créer la base imprimée en 3D de la bague » et, grâce au processus de moulage à cire perdue, « nous la coulerons dans le métal choisi – argent sterling 925 ou or 14 carats. »

Avec le recul, Melvin reconnaît qu'il a été difficile de constituer une équipe de personnes possédant les compétences très spécifiques nécessaires pour développer ces innovations clés. Cela est tout à fait compréhensible lorsqu'on sait qu'ils combinent le fossé entre le numérique et le physique tout en s'attaquant aux points sensibles liés à la personnalisation des bijoux en ligne, à la génération automatique de tailles, à la modélisation en 3D et à la chaîne d'approvisionnement intégrée.

Pour l'avenir, le plus grand défi que la marque devra relever sera de changer l'état d'esprit des clients. Les gens sont tellement habitués à entrer dans une bijouterie et à choisir parmi ce qui existe déjà. Le parcours de croissance de la marque sera donc axé sur l'éducation, sur le fait que les pièces personnalisées ne sont pas nécessairement hors de prix, sur le fait qu'il peut enfin avoir un produit conçu et fabriqué par lui, qui ne nécessite pas un maître artisan hautement qualifié.

### 3. Little You

Contrairement à d'autres entreprises, Christina Guo – la fondatrice – s'est engagée dès le départ à introduire la technologie d'impression 3D dans le marché des jouets pour enfants, car elle estime que cultiver la créativité dès le plus jeune âge est plus important que jamais. Pour ce faire, elle a développé une application où les enfants peuvent désormais concevoir leurs jouets en fonction des caractéristiques qu'ils souhaitent.

« L'entreprise a consacré un an au développement et à la recherche avant de lancer le produit. Dans un premier temps, nous avons validé le marché au moyen de 100 entretiens individuels avec notre marché cible âgé de 12 à 18 ans et d'une enquête auprès de plus de 1 000 enfants. Après avoir lancé notre site web, nous avons mené dix entretiens sur l'interface utilisateur avec nos clients cibles, et les retours ont été largement positifs. Après validation, nous avons commencé à construire le produit », a déclaré **Christina Guo** à 3D ADEPT Media.

Little You a pour ambition d'aider les enfants à développer leurs compétences sociales et leur fierté en montrant leur création réelle à leurs amis et à leur famille ; à se sentir représentés grâce à plus de 800 modèles qui leur



permettent de choisir la couleur de leur peau, leurs tenues, les expressions de leur visage, leurs lunettes, etc. et à avoir confiance en leur capacité à tout faire.

La plateforme conviviale qui permet aux enfants de créer des figurines et des personnages d'anime plus vrais que nature grâce à l'impression 3D.

La personnalisation est ici au cœur du processus de création. L'application «Little You» prend en charge plus de 800 modèles avec plus de 1000 créations laissant place à l'imagination sans fin des enfants et des étudiants.

Les jouets sont fabriqués à partir de différents matériaux durables comme le composite en fibre de verre de Palitra (anciennement Rize), la résine acrylique de Mimaiki et le grès en couleur de 3D Systems. Ces matériaux sont durables et sûrs pour les jeux manuels des jeunes enfants.

« Notre objectif est de créer une entreprise écologique et d'accélérer l'industrie de l'impression 3D en proposant des produits verts imprimés en 3D et fabriqués à partir de matériaux recyclables. Notre jeu est gratuit et le prix d'un jouet imprimé en 3D varie de 15 à 100 dollars, selon la complexité et la taille du produit final. Pour télécharger le fichier imprimable et l'imprimer chez soi, nous facturons 10 dollars par modèle. Little You a établi des connexions avec des fournisseurs d'impression 3D qui exécuteront toutes les commandes d'impression 3D que l'entreprise reçoit dans les 5 jours ouvrables. Les modèles seront imprimés à la demande et livrés aux clients. La livraison en Amérique du Nord prend environ 1 à 3 jours », précise **Christina Guo**.

La prochaine étape pour l'entreprise est d'apporter son application dans les salles de classe grâce à des partenariats avec des écoles. « Nous avons prévu une série d'activités que vous pouvez utiliser pour vos élèves dans le cadre des classes virtuelles et qui les aident à améliorer leur créativité. D'autres activités font appel à la technologie de l'impression 3D qui permettra à vos élèves de concevoir et de créer des personnages en 3D avec des caractéristiques personnalisables. Ces activités aideront les élèves à titiller leur esprit et à faire ressortir le meilleur d'eux-mêmes sous la forme de leurs propres personnages 3D », explique Guo. Si vous êtes un représentant d'une école et que vous lisez ces lignes, n'hésitez pas à contacter [Little You](#) ici.

AM Solutions Catalogue 2022

# AM SOLUTIONS

—  
INTERNATIONAL  
CATALOGUE  
2022

Edited by 3D ADEPT MEDIA

**INDUSTRIAL  
3D PRINTERS &  
POST-PROCESSING  
SOLUTIONS**

Published by [3D ADEPT Media](#)

## FA 101 : LES CONSEILS DE TROIS EXPERTS DU SECTEUR POUR RÉDUIRE LES COÛTS ET LES DÉLAIS DE L'IMPRESSION 3D.

Les ingénieurs et les concepteurs fabriquent des prototypes depuis des décennies, mais les outils, les matériaux et les procédés utilisés pour les créer évoluent constamment. En réalité, pour combler l'écart entre ce qui est conçu et ce qui est fabriqué, il faut comprendre, maîtriser et optimiser un large éventail de processus. Parfois, l'obtention de résultats satisfaisants dans une production de FA reste très dépendante de l'expérience globale des utilisateurs, car les facteurs de coût, les gains d'efficacité et les règles de conception ne se traduisent pas (toujours) directement d'un projet à l'autre. Cependant, il n'est jamais inutile d'apprendre de l'expérience des autres. Dans cet article d'opinion, nous avons décidé de recueillir les points de vue de trois experts qui ont acquis une expertise dans différents secteurs d'activité : l'espace, la R&D et les systèmes de gestion des piétons. Ils partagent aujourd'hui quelques conseils qu'ils auraient aimé connaître plus tôt dans leur utilisation de l'impression 3D.

**Sabrina Kerber** est architecte spatiale et astronaute analogique. Elle travaille actuellement comme pilote de drone chez [Avy](#) et a participé à une simulation lunaire dans le célèbre habitat HI-SEAS, où elle a joué le rôle d'ingénieur d'équipage. Elle s'est toujours efforcée de tirer parti des avantages de la fabrication additive pour l'habitation extraterrestre.

« Mon conseil préféré pour optimiser le flux de travail de la fabrication additive et garantir un processus efficace en termes de coûts et de temps est le suivant : « Apprenez à connaître votre machine ! » Investissez du temps pour apprendre tout ce que vous pouvez sur votre matériel et votre logiciel, mais aussi sur votre cas d'utilisation spécifique et l'environnement exact dans lequel vous allez opérer. Cela peut vous coûter quelques heures et du matériel au début, mais à long terme, le fait de bien connaître les particularités de votre outil vous permettra de rationaliser le processus et d'obtenir des résultats optimaux. Chaque imprimante 3D est un peu différente ; chaque environnement a un ensemble de paramètres différent - le résultat de vos impressions peut être influencé par l'altitude à laquelle vous imprimez, l'humidité et la température et la façon dont vous êtes capable de contrôler ces facteurs avec votre machine. Dans le même temps, chaque cas d'utilisation requiert des aspects et des résultats différents. Assurez-vous de savoir où se trouvent les points faibles de votre impression



- métaphoriquement parlant, mais aussi littéralement. Dans quels domaines pouvez-vous gagner du temps, quels sont les points qui nécessitent une attention particulière pendant le processus de conception et d'impression ? J'étudie **les avantages de la fabrication additive pour l'exploration spatiale, dont le plus important est la possibilité de réduire la charge utile et de diminuer la nécessité de missions de réapprovisionnement**, ce qui se traduira par une mission plus rapide et plus économique. Cependant, dans un environnement isolé, tel qu'une mission spatiale ou une simulation analogique, l'utilisation réussie de l'impression 3D dépend fortement de la connaissance par l'équipage de chaque détail du flux de travail de sa machine spécifique, ainsi que de ce qu'il peut en attendre dans un environnement aussi extrême. »

**Juan Carlos Cruz Robles** a passé les 10 dernières années dans la R&D des technologies de fabrication additive. Sur ces années, 6 ont été consacrées à la mise au point du matériel et du processus de développement des matériaux pour les technologies de photopolymérisation VAT chez 3D Systems. Plus récemment, il est passé chez PPG, où il apporte son expérience de la fabrication additive pour renforcer leurs capacités. Ci-dessous, il souligne un facteur important pour augmenter la productivité des technologies de FA de photopolymérisation VAT :

« Il existe plusieurs approches sur la façon d'être aussi efficace que possible sur un flux de travail lors de l'utilisation d'une des technologies de FA. Une grande partie du flux de travail est le **post-traitement**. Beaucoup de gens pensent que la vitesse de l'impression 3D est le goulot d'étranglement. Cependant, la plupart du temps, une pièce fonctionnelle, quelle que soit la technologie de FA, doit être soumise à un cycle de post-traitement, qui peut parfois prendre plus de temps que l'étape d'impression. Il est donc crucial, pour un processus de FA efficace, de prendre en compte les goulets d'étranglement potentiels dans le cycle de post-traitement afin d'obtenir le meilleur débit possible.

Pour le post-traitement du procédé de photopolymérisation, en particulier,



le nettoyage est essentiel non seulement pour éliminer l'excès de résine, mais aussi parfois pour traiter les surfaces afin qu'elles ne deviennent pas collantes. En fonction de la viscosité de la résine et des solvants de nettoyage, le cycle de nettoyage peut augmenter de manière excessive si les solvants de nettoyage ne sont pas contrôlés en permanence. Les solvants de nettoyage typiques sont l'IPA, le TPM ou une combinaison des deux. Un hydromètre est recommandé pour vérifier constamment la saturation des solvants et s'assurer qu'un seuil n'est pas atteint. Sinon, le processus de nettoyage prendra plus de temps et finira par ne plus fonctionner du tout. »

Quel que soit le procédé de FA que vous utilisez, il y a de grandes chances que le post-traitement reste l'une des étapes les plus chronophages du processus de fabrication. Certaines technologies nécessitent moins de post-traitement que d'autres, mais toutes les pièces imprimées en 3D requièrent un certain degré de post-traitement. Il peut être intéressant de connaître la variété des étapes que les pièces imprimées en 3D doivent subir sous ce [grand terme générique](#), mais ce qui vous aidera à réduire le temps de travail et les coûts, c'est de trouver celles qui peuvent être automatisées.

**Josep Maria Salvador Morón** est concepteur et responsable technique chez [DLIMIT](#), une entreprise qui a plus de 15 ans d'expérience dans la fabrication et la distribution de systèmes de gestion des piétons.

« Si vous voulez optimiser votre flux d'impression 3D, je recommande toujours un peu de planification. C'est super important de savoir combien de temps les pièces mettent à être imprimées. Si j'aurai assez de matière pour une impression particulière ou si la pièce sera terminée demain quand j'arriverai au bureau. Ce type de questions vous amène à des réponses telles que : il est parfois préférable d'imprimer moins de pièces et d'être en mesure de réaliser deux impressions au cours de votre journée de travail, plutôt que de remplir complètement la surface et de voir votre impression s'arrêter à 19 heures, lorsqu'il n'y a personne au bureau pour réaliser une nouvelle impression.

En revanche, si on parle d'un grand nombre de pièces à produire, il existe des technologies et des imprimantes 3D telles que la technologie IDEX de BCN3D qui imprime deux prototypes identiques ou symétriques en même temps, optimisant ainsi les temps de production. Par exemple, ce n'est pas la même chose d'imprimer 40 unités sur une surface d'impression avec un extrudeur que d'en imprimer 20 + avec deux extrudeurs travaillant simultanément. Ce sont les mêmes 40 unités, mais nous avons réduit le temps de production de moitié.

Au niveau de la conception, il est toujours conseillé de réduire au maximum la taille des pièces afin d'économiser du temps et du matériel. Parfois, les services internes ont tendance à surdimensionner les pièces pour leur donner plus de consistance mécanique. Je recommande de faire confiance à la technologie, sans demander l'impossible. Cela peut sembler compliqué au début, mais avec la pratique, on apprend beaucoup. »

Voici quelques bonnes pratiques pour optimiser le calendrier de fabrication :

- o Regrouper plusieurs pièces en une seule fabrication.
- o Imprimez de petites séries plus courtes pendant la



Juan Carlos Cruz Robles

journée et de grandes séries pendant la nuit.

- o Utiliser plusieurs imprimantes pour répartir la charge de travail et augmenter le rendement le jour même.

- o Utiliser des tableaux de bord pour recevoir des alertes lorsqu'une impression se termine et pour gérer et surveiller plusieurs imprimantes à distance.

Cela dit, vous pouvez lire des milliers de conseils par jour, mais si vous ne comprenez pas vos besoins et les raisons pour lesquelles vous choisissez un processus de FA spécifique plutôt qu'un autre, il y a de fortes chances que vous ne soyez pas satisfait de vos résultats. Comme vous l'avez peut-être compris, la finition et les détails n'auront pas nécessairement d'importance pour les modèles conceptuels de base, alors que les prototypes réels peuvent nécessiter des technologies et des matériaux conçus pour des détails fins et des finitions de surface de haute qualité.

**Et vous, quel procédé d'impression 3D utilisez-vous et quelle est votre astuce pour optimiser votre flux de production ?**

**ASSUREZ-VOUS DE  
VOUS INSCRIRE À NOTRE  
NEWSLETTER POUR  
RECEVOIR LES DERNIÈRES  
NOUVELLES DE L'INDUSTRIE  
ET LES AVANCÉES EN  
MATIÈRE DE FABRICATION  
ADDITIVE.**



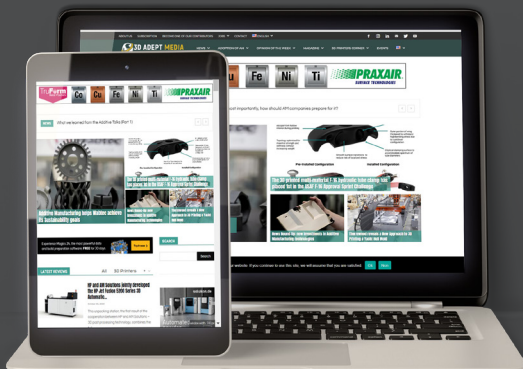
3D Adept est une société de communication dédiée à l'industrie de l'impression 3D. Nos médias fournissent en anglais et en français, les dernières tendances et analyses de l'industrie de l'impression 3D. 3D Adept Media comprend un média en ligne et un magazine bimestriel, 3D Adept Mag. Tous les numéros de 3D Adept Mag peuvent être téléchargés gratuitement. Notre mission est d'aider toute entreprise à développer ses services et activités dans le secteur de l'impression 3D.

# 3D ADEPT MAG

Le Magazine de la Fabrication Additive



6 numéros par an



[www.3dadept.com](http://www.3dadept.com)

## Contact us !!!

[contact@3dadept.com](mailto:contact@3dadept.com)

[www.3dadept.com](http://www.3dadept.com)

+32 (0)4 89 82 46 19

Rue Borrens 51, 1050 Brussels - BELGIUM



2  
0  
2  
2  
▼

# RECEVEZ LE MAG CHEZ-VOUS !

Vous pouvez aussi recevoir gratuitement par email la version digitale du magazine. L'abonnement au magazine digital vous donne aussi un accès exclusif à notre newsletter hebdomadaire. Pour toute information, n'hésitez pas à nous envoyer un mail.



ABONNEZ-VOUS À NOTRE NEWSLETTER ET  
RECEVEZ LES DERNIÈRES NOUVELLES DE LA F.A

[WWW.3DADEPT.COM](http://WWW.3DADEPT.COM)