

# Les alliages métalliques complexes

## De nouveaux matériaux pour la fabrication rapide

Samuel Kenzari, David Bonina, Jean Marie Dubois et Vincent Fournée

### Résumé

Les procédés de fabrication rapide s'attachent à réaliser en un temps réduit la représentation physique d'un modèle CAO en trois dimensions sans contrainte de forme. Ce domaine est en plein développement depuis une vingtaine d'années et regroupe plusieurs techniques de prototypage rapide comme le frittage laser ou la stéréolithographie. Cependant, la gamme de matériaux utilisés est restreinte alors qu'il existe une réelle attente en termes d'allègement des pièces. Les travaux réalisés à l'Institut Jean Lamour depuis quelques années ont permis plusieurs avancées, grâce à l'introduction de nouveaux matériaux appelés alliages métalliques complexes. Ce sont des alliages essentiellement à base d'aluminium et de structure cristalline faiblement périodique – ou aperiodique dans le cas des quasicristaux – dont les propriétés diffèrent de celles rencontrées dans les alliages conventionnels. L'utilisation de ces matériaux permet de réaliser des pièces complexes soit en composite métal-intermétalliques légers, soit en composite à base polymère aux propriétés améliorées. Des pièces fonctionnelles utilisant ces alliages sont désormais commercialisées.

### Mots-clés

**Quasicristal, composite, frittage laser sélectif, fabrication rapide, tribologie, innovation.**

### Abstract

#### **Complex metallic alloys: new materials for rapid manufacturing**

Rapid manufacturing processes allow freeform fabrication of the physical representation of a three dimensional CAD data model. This area has been expanding rapidly over the last twenty years. It includes several rapid prototyping techniques such as selective laser sintering and stereolithography. The range of materials used today is quite restricted while there is a real demand for manufacturing lighter functional parts. This article summarizes recent works performed in this field at the Jean Lamour Institute, introducing new materials based on complex metallic alloys. These are mainly Al-based alloys that are weakly periodic – or even aperiodic in the case of quasicrystals – whose properties differ from those of conventional alloys. The use of these materials allows us to produce light-weight parts consisting of either metal-intermetallic composites or of polymer-based composites with improved properties. Functional parts using these alloys are now commercialized.

### Keywords

**Quasicrystal, composite, selective laser sintering, rapid manufacturing, tribology, innovation.**

Les méthodes de fabrication additive consistent à réaliser des objets tridimensionnels (3D), le plus souvent couche par couche, à partir d'un simple fichier informatique (un modèle CAO – conception assistée par ordinateur). Elles s'opposent aux méthodes plus traditionnelles de fabrication dites soustractives, comme par exemple l'usinage qui procède par élimination de matière. Ces nouvelles méthodes de fabrication connaissent un fort développement et touchent énormément de secteurs industriels (automobile, aéronautique, outillage, médical et dentaire, design...). Elles génèrent des revenus mondiaux estimés à 200 M\$ en 2011 et un taux de croissance annuel de l'ordre de 10 %.

Le frittage laser sélectif (SLS) est l'un de ces procédés. Il est utilisé pour le prototypage rapide ou la fabrication rapide d'objets 3D, sans contrainte de forme. Par exemple, l'objet montré sur la *figure 1* ne pourrait tout simplement pas être construit par fabrication soustractive.

Le procédé fonctionne de la manière suivante. L'objet à réaliser est modélisé dans un fichier CAO et décomposé en autant de sections bidimensionnelles d'une épaisseur de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  que nécessaire. Les couches sont fabriquées successivement selon le principe illustré sur la *figure 2*. Une première couche de poudre est étalée par un rouleau automatisé et un laser infrarouge est utilisé pour transformer cette poudre en un objet solide par « frittage sélectif » sans pression extérieure, selon le tracé 2D défini par le modèle CAO. La poudre utilisée contient au moins un



Figure 1 - Pièce à base d'alliage métallique complexe fabriquée par frittage laser sélectif.

polymère dont la température de fusion est en général de l'ordre de 200 °C. Le lit de poudre est préchauffé et le laser ne fournit localement que l'énergie thermique nécessaire pour amener le polymère à une température entraînant sa fusion.

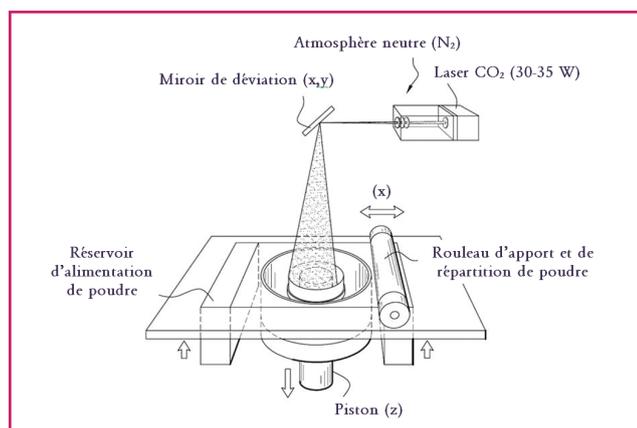


Figure 2 - Le frittage laser sélectif (SLS).

Le laser trace la forme par couches successives lorsque le piston descend. La poudre non soumise à l'action du laser sert de support aux couches « frittées ».

Les poudres non fondues par l'action du laser assurent naturellement le support des couches suivantes. Puis la plate-forme de travail mobile descend de l'épaisseur d'une couche, une nouvelle couche de poudre est étalée et le cycle recommence pour construire la pièce de bas en haut.

Le procédé SLS est utilisé pour construire soit des pièces constituées entièrement de polymère, soit des pièces composites à matrice polymère renforcée par des particules, soit des pièces entièrement métalliques. Dans ce dernier cas, on parle de SLS indirect puisqu'il faut dans un premier temps réaliser une préforme poreuse obtenue par frittage SLS d'une poudre métallique chargée avec des particules de polymère. À ce stade, l'objet est un composite métal/polymère contenant 40-50 % de porosité en volume. Il est suffisamment rigide pour être manipulé, mais n'a pas de tenue mécanique suffisante pour être utilisé directement. Cette préforme doit donc être soumise dans un deuxième temps à un traitement thermique au cours duquel le polymère est délianté (évacué sous forme de gaz) et concomitamment, la pièce est infiltrée par un métal d'apport dont le point de fusion est nécessairement inférieur à celui du métal de base utilisé. L'infiltration de la préforme poreuse par le métal d'apport liquide se fait par capillarité. À l'issue de ce traitement, on obtient alors une pièce composite entièrement métallique constituée de la base métallique et du métal d'apport. En pratique, le procédé SLS indirect n'est bien maîtrisé que pour les composites acier/bronze.

Depuis les années 2000, une série de travaux a été réalisée pour étendre la gamme de matériaux utilisables en SLS indirect aux alliages légers, en particulier les alliages d'aluminium. Mais ces développements restent aujourd'hui encore au stade de défi technologique. L'aluminium est également utilisé en SLS direct, incorporé dans une matrice polymère pour obtenir essentiellement un composite à l'aspect métallique [1]. Ce composite présente un taux de porosité important qui interdit son utilisation pour des applications nécessitant une étanchéité parfaite à de faibles épaisseurs de pièces. Ce problème d'étanchéité persiste d'ailleurs pour tous les matériaux de renfort utilisés en SLS direct, pas seulement l'aluminium. Pour y palier, les pièces composites en polymère renforcé doivent subir une seconde étape d'imprégnation par une résine liquide. D'autre part, les propriétés d'usure et de frottement des matériaux composites mis en œuvre par SLS direct sont relativement médiocres, ce qui limite leur utilisation pour des pièces mobiles.

Les travaux présentés ici montrent comment certains des problèmes évoqués ci-dessus ont pu être résolus grâce à l'introduction de nouveaux matériaux : les alliages métalliques complexes (CMA pour « complex metallic alloys »). Dans le cas du SLS indirect, il s'agit d'obtenir des pièces fonctionnelles entièrement métalliques constituées de différents alliages légers (bases Al). Dans le cas du SLS direct, des particules de CMA sont utilisées comme renfort d'une matrice polymère pour en améliorer les propriétés.

## Les alliages métalliques complexes

Ce qu'on appelle aujourd'hui les alliages métalliques complexes sont une famille d'intermétalliques dont la structure atomique est caractérisée par l'existence d'un grand nombre d'atomes constituant la maille élémentaire permettant de décrire tout solide cristallin. Pour un cristal cubique face centrée (*cfc*) comme l'aluminium, la maille élémentaire contient seulement quatre atomes et le cristal d'aluminium est déduit par translation périodique de cette maille selon les trois directions de l'espace. Dans un CMA, la maille élémentaire contient généralement quelques centaines d'atomes (voire quelques dizaines de milliers d'atomes dans certains cas), qui forment en général des agrégats de haute symétrie, icosaédrique par exemple (symétrie d'ordre 5) ou décagonale (symétrie d'ordre 10). Ces agrégats sont reliés entre eux par des atomes dits « ciments ». Les CMA constituent un sujet devenu très actif en chimie du solide depuis la découverte des quasicristaux par Dan Shechtman en 1982 [2]. Les quasicristaux sont en effet considérés comme un cas limite de CMA, avec une maille élémentaire de dimension infinie. Autrement dit, les quasicristaux sont des alliages ordonnés mais ne présentant pas de symétrie de translation comme tous les cristaux classiques. Leur découverte vient d'être saluée par l'attribution du prix Nobel de chimie 2011 à son découvreur [3]. Ces alliages particuliers ont d'abord attiré l'attention pour leur structure dont les principes ont révolutionné la cristallographie classique, puis pour leurs propriétés physiques liées à cet ordre nouveau de la matière condensée. Parmi les propriétés remarquables, on peut citer des propriétés de transport (électronique et thermique), qui sont de type antimétallique alors qu'ils sont constitués de « bons » métaux comme l'aluminium, le cuivre et le fer par exemple. Du point de vue des applications, ces alliages présentent souvent des coefficients de frottement relativement bas, une bonne résistance à la corrosion, une faible mouillabilité, une résistance à l'usure... [4]. Ces propriétés d'usage sont cependant difficiles à mettre en œuvre du fait d'une fragilité rédhibitoire pour une utilisation sous forme de matériaux massifs. Le mélange de ces phases à une matrice ductile est une alternative permettant de pallier leur grande fragilité. L'utilisation de ces matériaux est donc plutôt envisagée sous forme de films minces ou comme particules de renforts dans des composites. Plusieurs années de recherche ont montré que l'utilisation des CMA dans des composites à matrice métallique [5] ou à matrice polymère [6] est prometteuse, permettant d'obtenir des matériaux de faible densité qui, dans certains cas, conservent les propriétés physiques intéressantes des CMA. Les résultats résumés dans les paragraphes suivants illustrent le potentiel de ces nouveaux composites dans le domaine de la fabrication laser en les comparant aux solutions industrielles existantes [7-8].

## Fabrication de pièces métalliques par SLS indirect

La méthode SLS indirect n'est actuellement bien maîtrisée que pour le couple acier/bronze et de nombreuses études ont été réalisées dans le but de l'adapter à des nuances d'alliages d'aluminium. Il s'agit de fabriquer dans un premier temps une préforme poreuse constituée de particules d'une certaine nuance d'aluminium et d'un liant polymère, puis d'infiltrer cette préforme avec une autre nuance d'aluminium de point de fusion plus bas. Or, il ressort que les pièces ainsi produites possèdent toujours une faible tenue mécanique [9-10]. L'origine de cette fragilité est due à un phénomène de nitruration des interfaces, étape qui s'avère nécessaire pour permettre à la fois l'infiltration totale et la conservation de la stabilité dimensionnelle de la préforme au cours de l'infiltration. En conséquence, il n'existe pas sur le marché de réel substitut au composite de référence (acier/bronze) utilisé en prototypage rapide de pièces métalliques.

Ce problème de nitruration peut être évité en utilisant un alliage métallique complexe à base d'aluminium. Il s'agit dans ce cas particulier d'une phase quasicristalline icosaédrique AlCuFeB. C'est un intermétallique relativement léger (densité < 4,7 g/cm<sup>3</sup>) et dont la stabilité thermique est supérieure à 800 °C, c'est-à-dire bien supérieure à n'importe quelle nuance commerciale d'aluminium.

La réalisation d'une pièce infiltrée s'effectue classiquement : préparation d'un mélange de poudre adaptée pour le SLS ; fabrication d'une préforme CMA poreuse par SLS suivie d'une post-infiltration sous vide primaire (1.10<sup>-2</sup> mbar). La première étape est celle qui influence directement la qualité finale de la préforme. Un mélange homogène de poudres (CMA + liant polymère) garantira la possibilité d'utiliser le procédé SLS pour obtenir des préformes homogènes et manipulables (figure 3).

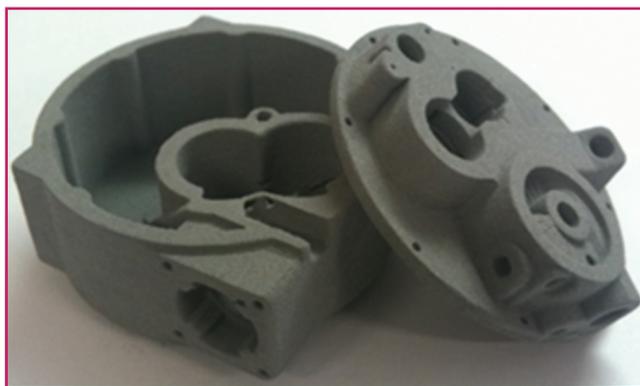


Figure 3 - Exemples de préformes contenant une poudre quasicristalline et un liant polymère.

La stabilité thermique élevée de l'alliage CMA permet d'utiliser comme infiltrant un alliage d'aluminium conventionnel. La figure 4 montre une pièce CMA infiltrée sous vide par un aluminium 1050 (99,8 % Al) et une préforme CMA seule.

Dans ce procédé indirect, le plus difficile est de faire fondre un alliage d'aluminium d'apport, puis de l'infiltrer dans une préforme, elle-même à base d'aluminium, et ce dans un four industriel sous atmosphère neutre. On évite dans ce cas de nitrurer les interfaces de la préforme.



Figure 4 - À gauche : préforme obtenue par SLS. À droite : pièce infiltrée sous vide par un alliage Al-1050.

La densité finale est de 4 g/cm<sup>3</sup>, soit deux fois plus faible que celle des composites acier/bronze.

La réussite du transfert technologique repose donc en grande partie sur cette étape, c'est-à-dire sur la maîtrise du cycle thermique d'infiltration. Effectivement, la thermique joue un rôle décisif, tout comme la durée de maintien en température à partir de laquelle l'infiltrant devient liquide. Il est nécessaire d'avoir un temps suffisamment long pour obtenir une infiltration totale et garantir une diffusion chimique aux interfaces. Cependant, un maintien trop long déforme la pièce, tout comme une température d'infiltration trop élevée. Le principal intérêt du recours aux CMA est que leur point de fusion est élevé pour des alliages d'aluminium ( $\geq 800$  °C), ce qui laisse une fenêtre de température pour l'infiltration du métal d'apport bien supérieure par rapport aux alliages classiques.

Les pièces réalisées présentent peu de porosités (similaires aux pièces en acier/bronze). De plus, les analyses par diffraction des rayons X (DRX) ainsi que les observations au microscope électronique à balayage montrent que nous obtenons un alliage dans son sens usuel. Ainsi, les interfaces n'existent pas au sens « matériau composite ». Les analyses par DRX indiquent que les pièces sont constituées de plusieurs phases CMA et ne contiennent plus d'aluminium cristallin. Cette absence d'aluminium *cfc* après infiltration résulte de transformations de phases induites par la diffusion chimique de l'aluminium vers les particules de CMA pendant le cycle d'infiltration (3 h, 680 °C). La phase quasicristalline se transforme majoritairement en phase quadratique  $\omega$ -Al<sub>70</sub>Cu<sub>20</sub>Fe, connue pour sa contribution bénéfique dans les composites à matrice d'aluminium [11-12]. Ceci a comme conséquence d'engendrer des propriétés de dureté remarquables pour une base Al. Les pièces atteignent facilement un domaine de dureté Vickers de 300-400 Hv, ce qui les rend fragiles<sup>(1)</sup>. Il est cependant possible d'optimiser le procédé par des traitements thermiques post-infiltration (revenus, recuits), permettant de réduire la dureté jusqu'à 200 Hv, soit des valeurs similaires à celle des pièces acier/bronze, avec une densité divisée par un facteur 2, ce qui était l'objectif visé.

En conclusion, une nouvelle gamme de poudres composites à base de CMA a été développée pour une utilisation en SLS indirect. Elle permet de fabriquer des préformes quasicristallines sans contrainte de forme, et de les infiltrer par un second alliage d'aluminium par capillarité [7]. Les pièces composites sont entièrement métalliques, peu poreuses et de faible densité massique. Cette méthode peut en principe être étendue à un large spectre de compositions chimiques en variant la nature de la phase CMA sélectionnée.

## Fabrication directe de pièces CMA/polymère par SLS

Des travaux antérieurs de Bloom *et coll.* aux États-Unis ont montré que des particules quasicristallines utilisées comme renfort d'une matrice polyamide (PA) permettent d'obtenir des matériaux composites bénéficiant des propriétés de résistance à l'usure et aux frottements liées aux CMA [6]. Nous avons donc adapté ce type de matériaux pour une utilisation en SLS pour la fabrication directe de pièces 3D. Il s'agit de composites à matrice polymère très légers ( $< 2 \text{ g.cm}^{-3}$ ) renforcée par des CMA ( $> 50 \%$  poids) [8]. À partir des travaux de recherche effectués au laboratoire, nous avons sélectionné un domaine de composition optimisé et nous l'avons adapté pour une utilisation en SLS, c'est-à-dire propre à un transfert technologique. La mise au point des paramètres expérimentaux (laser, température, vitesse...) a permis d'obtenir des pièces denses, sans contrainte de forme et avec une tolérance dimensionnelle et une qualité de peau de pièce similaires à celles des composites SLS commerciaux. La taille maximale (x.y.z) des pièces peut atteindre 380 x 330 x 450 mm ( $\approx 60$  litres). Les pièces obtenues possèdent des propriétés de frottement, d'usure et d'étanchéité améliorées par rapport aux autres matériaux actuellement utilisés commercialement. Les principaux résultats sont résumés ci-après.

### Propriétés de frottement

Nous avons mesuré les propriétés de frottement à l'aide d'un tribomètre de type pion/disque. Le frotteur utilisé était une bille d'acier (100Cr6) de 6 mm de diamètre. La charge normale appliquée sur le frotteur était de 10 N. Le mouvement de frottement était circulaire, avec un rayon de 5 mm. Les essais ont été réalisés sans lubrification, à la pression atmosphérique et à température ambiante. L'humidité relative était comprise entre 50 et 60 %. Avant l'essai de frottement, la surface des échantillons a été polie à l'eau avec du papier abrasif SiC jusqu'au grade 4000. Les échantillons ont ensuite été nettoyés à l'éthanol et séchés au séchoir électrique. Les surfaces des échantillons et de la bille ont été nettoyées à l'acétone juste avant les essais. La vitesse de frottement était de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ . Le rapport entre la force latérale et la force normale définit le coefficient de frottement  $\mu$ .

Les courbes de frottement mesurées sur une série d'échantillons composites élaborés par SLS sont présentées figure 5. Il s'agit de composites renforcés par des fibres de

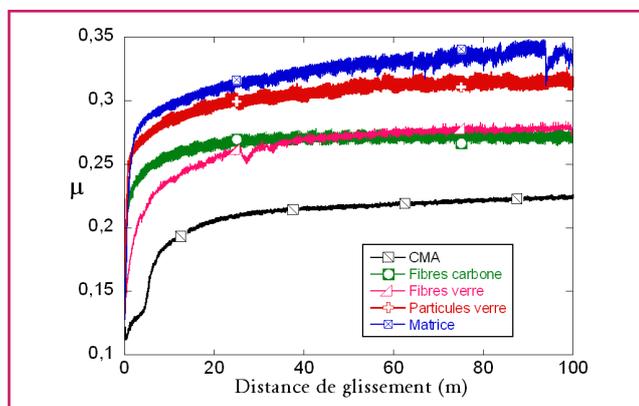


Figure 5 - Évolution du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement pour différents matériaux obtenus par SLS.

carbone, de verre ou des particules d'aluminium (matériaux commerciaux) et d'un composite contenant des particules de CMA. Les essais montrent clairement que le frottement le plus faible est systématiquement obtenu pour les composites à base de CMA. Par comparaison aux composites commerciaux, tels que ceux contenant des particules d'aluminium cristallin, les composites contenant des particules de CMA ne sont presque pas dégradés après frottement comme le montrent les images de microscopie électronique à balayage de la figure 6.

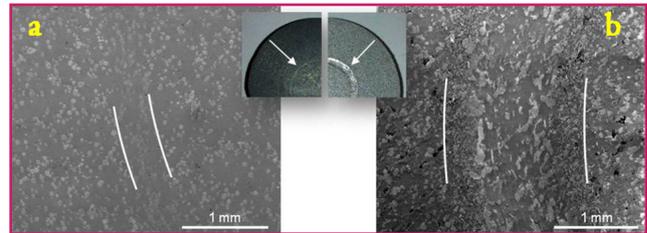


Figure 6 - Trace de frottement observée (a) après 100 m sur un composite renforcé par des particules de CMA, et (b) après 60 m de frottement sur un composite renforcé par des particules d'aluminium cristallin.

La trace est à peine visible à l'œil pour le composite CMA. Dans l'autre cas, la dégradation à l'interface de contact est très prononcée.

La dégradation très prononcée des composites contenant des particules d'aluminium résulte d'un transfert de matière à l'interface de contact entre le frotteur et l'échantillon. Les cartographies chimiques montrent que la matière transférée est constituée essentiellement d'aluminium et d'oxygène, ce qui laisse penser à la présence d'oxydes d'aluminium (figure 7).

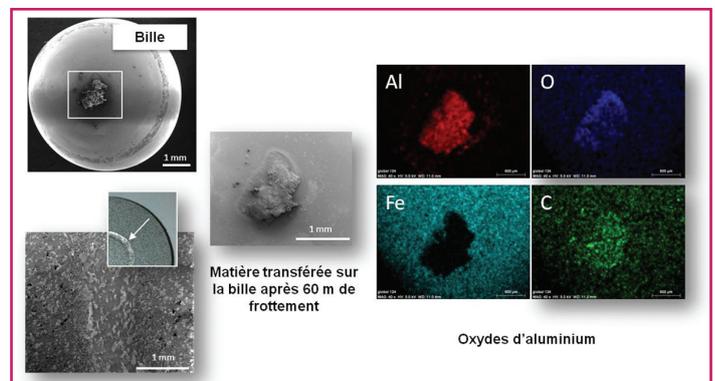


Figure 7 - Après 60 m de frottement sur un composite renforcé par des particules d'aluminium cristallin, la matière transférée sur la bille d'acier est essentiellement constituée d'oxydes d'aluminium. Dans le cas d'un composite CMA, il n'y a pas de matière transférée après 100 m de frottement.

Cette matière agit donc comme un troisième corps qui accentue d'autant plus les forces tangentielles de frottement lors de l'essai et entraîne l'arrêt de l'essai autour de 60 m de frottement (figure 8). Dans le cas des composites CMA, on ne détecte pas de couche de transfert.

### Propriétés d'usure

Les essais d'usure ont été réalisés à l'aide d'une polisseuse automatique. Le principe de l'essai est le suivant : un échantillon de 25 mm de diamètre est placé dans un

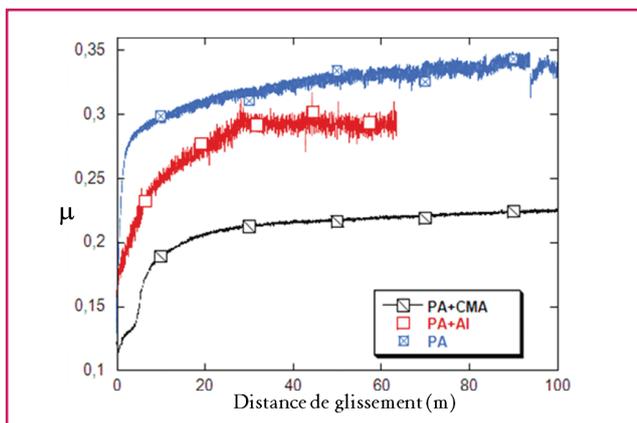


Figure 8 - Évolution du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement pour différents matériaux obtenus par SLS. Après 60 m de frottement sur un composite à base d'aluminium cristallin, les forces de frottement sont telles que l'essai s'arrête.

porte-échantillon rotatif, lui-même placé sur un disque de polissage (SiC 500). Le plateau de polissage est animé d'une vitesse de rotation de 150 tours/min pendant que le porte-échantillon tourne à la même vitesse. L'usure est traduite par la différence de volume de l'échantillon après l'essai.

La figure 9 permet de comparer les volumes d'usure des mêmes échantillons. Les résultats confirment l'excellente résistance à l'usure des composites CMA fabriqués par SLS.

Selon la composition choisie, le gain apporté par rapport au polymère seul ou à un composite aluminium/polymère est d'environ 70 % (figure 9a).

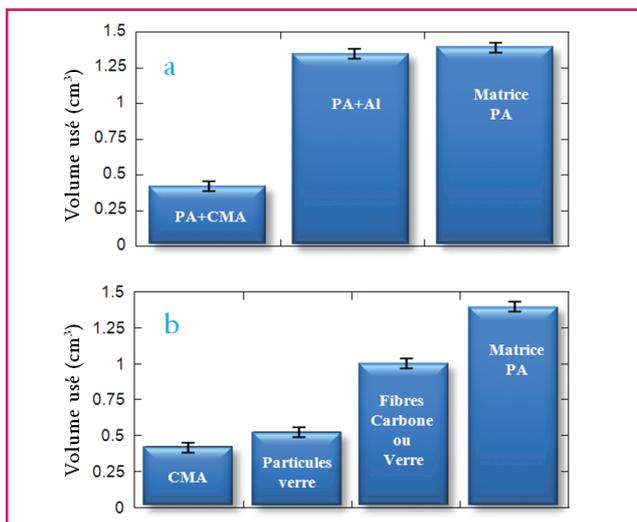


Figure 9 - Comparaison des volumes d'usure des matériaux obtenus par SLS après une minute d'abrasion sous eau.

Les volumes d'usure de ces composites CMA ont été comparés à ceux obtenus avec les matériaux SLS commerciaux (figure 9b). Il s'agit de composites SLS renforcés par des fibres de carbone (ou de verre) ou par des particules de verre. Les essais attestent à nouveau d'une meilleure résistance à l'usure en faveur des composites contenant des CMA.

### Propriétés d'étanchéité

De manière surprenante, et à la différence des composites SLS classiques, la densité relative des pièces



Figure 10 - Répartiteur d'admission d'air directement fonctionnel après fabrication SLS (avec la permission des Ateliers CINI et MV2T, DR).

composites renforcées par des CMA est proche de 99 % de la densité théorique. Cette valeur n'atteint que 85 % pour les composites d'aluminium. Ce très faible taux de porosité leur confère une étanchéité à l'air, à l'eau, sous pression (7 bars) et en température (> 100 °C) jusqu'alors impossible à obtenir lorsque le procédé est mis en œuvre à partir de poudres composites commerciales (à taux et taille de particules similaires). L'origine de ce résultat réside vraisemblablement dans les propriétés de surface et de volume spécifiques aux CMA. Des mesures d'angles de contact d'une goutte de polymère liquide déposée sur une surface quasicristalline ou une surface d'aluminium cristallin montrent dans les deux cas une bonne mouillabilité à température ambiante (angle de contact inférieur à 90°). Par ailleurs, la conductivité thermique de la phase quasicristalline AlCuFeB est environ cent fois inférieure à celle de l'aluminium. En conséquence, l'énergie thermique apportée par le laser pour mettre en fusion le liant polymère est beaucoup moins facilement dissipée dans le cas de renfort CMA, ce qui doit augmenter la durée pendant laquelle le liant polymère reste liquide et peut remplir les porosités sous l'action du laser, en améliorant ainsi la densification des pièces [13]. On peut ainsi réaliser des pièces directement étanches, jusqu'alors impossibles à obtenir sans post-imprégnation de résine liquide. Ce résultat est important d'un point de vue pratique, puisqu'il permet de réduire d'un facteur 2 le temps de fabrication des pièces.

### Exemple d'application

L'étanchéité est une propriété utile pour bon nombre d'applications telles que les pièces d'un environnement moteur (température < 130 °C, pression < 2 bars) : vannes thermostatiques, réservoirs d'eau, d'huile, boîtiers de sortie d'eau... L'exemple de la figure 10 représente un répartiteur d'admission d'air pour la compétition automobile. Cette pièce est fabriquée en une seule partie et est directement étanche après fabrication SLS pour une épaisseur de paroi de seulement 2 mm.

Le dessin des pièces est également simplifié et le temps de fabrication réduit. En effet, il est normalement nécessaire de fabriquer deux demi-parties, de les post-résiner, de les recoller ensemble, puis d'effectuer un polissage manuel

pour atténuer le joint de collage. La suppression de toutes ces étapes est rendue possible grâce à l'utilisation de ce nouveau matériau composite.

## Conclusion

Deux nouveaux types de composites ont été développés pour une utilisation en frittage laser sélectif, direct ou indirect, utilisant des alliages métalliques complexes. Ils permettent d'élargir le champ des possibles dans un secteur industriel en pleine expansion. Ils ont donné lieu à deux brevets [7-8] qui sont utilisés par les Ateliers CINI SA (Tomblaine, France) et exploitables sous licence.

## Note et références

- (1) À titre de comparaison, la dureté Vickers de l'aluminium ou du cuivre est inférieure à 50 Hv, celle d'un acier est de l'ordre de 150 Hv, 250 Hv pour l'inox, jusqu'à 800 Hv pour un acier trempé, et environ 2 000 Hv pour une céramique comme l'alumine.
- [1] Mazzoli A., Moriconi G., Pauri M.G., Characterization of an aluminum-filled polyamide powder for applications in selective laser sintering, *Materials and Design*, **2007**, 3(28), p. 993.
- [2] Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J.W., Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry, *Phys. Rev. Lett.*, **1984**, 20(53), p. 1951.
- [3] Bernier J.-C., Daniel Shechtman, prix Nobel de chimie 2011 : la saga des quasi-cristaux, *L'Act. Chim.*, **2011**, 358, p. 4.
- [4] Dubois J.M., Kang S.S., Massiani Y., Application of quasicrystalline alloys to surface coating of soft metals, *J. Non Cryst. Solids*, **1993**, 153-154, p. 443.
- [5] Tsai A.P., Aoki K., Inoue A., Masumoto T., Synthesis of stable quasicrystalline particle-dispersed Al base composite alloys, *J. Mater. Res.*, **1993**, 1(8), p. 5.
- [6] Bloom P.D., Baikerikar K.G., Otaigbe J.U., Sheares V.V., Development of novel polymer/quasicrystal composite materials, *Mater. Sci. Eng. A*, **2000**, 294-296, p. 156.

- [7] Kenzari S., Fournée V., *Procédé d'élaboration de pièces en alliage d'aluminium*, Brevet FR 2929541, **2008**, PCT n° WO2009/144405, **2009**.
- [8] Kenzari S., Fournée V., *Procédé d'élaboration d'une pièce contenant de l'aluminium*, Brevet FR 2950826, **2009**, PCT n° WO2011/039469, **2011**.
- [9] Sercombe T.B., Schaffer G.B., Rapid manufacturing of aluminum components, *Science*, **2003**, 5637(301), p. 1225.
- [10] Sercombe T.B., Schaffer G.B., On the role of magnesium and nitrogen in the infiltration of aluminium by aluminium for rapid prototyping applications, *Acta Mat.*, **2004**, 10(52), p. 3019.
- [11] Lee S.M., Jung J.H., Fleury E., Kim W.T., Kim D.H., Metal matrix composites reinforced by gas-atomised Al-Cu-Fe powders, *Mat. Sci. Eng. A*, **2000**, 294-296, p. 99.
- [12] Tang F., Anderson I.E., Biner S.B., Microstructures and mechanical properties of pure Al matrix composites reinforced by Al-Cu-Fe alloy particles, *Mat. Sci. Eng. A*, **2003**, 1-2(363), p. 20.
- [13] Kenzari S., Bonina D., Dubois J.M., Fournée V., Quasicrystal-polymer composites for selective laser sintering technology, *Materials & Design*, **2012**, 35, p. 691.



S. Kenzari



D. Bonina



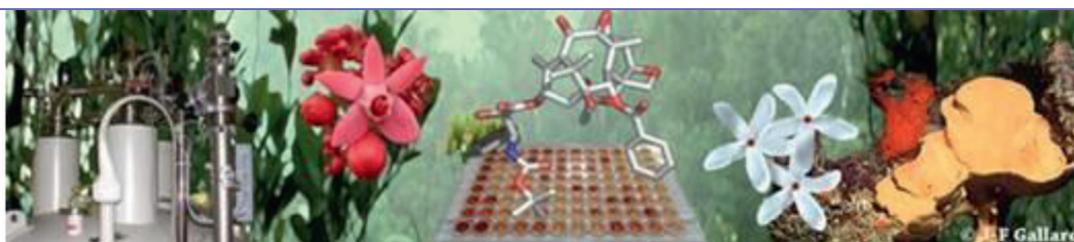
J.M. Dubois



V. Fournée

**Samuel Kenzari** (auteur correspondant) est ingénieur de recherche CNRS, **David Bonina**, technicien de recherche à l'INPL, **Jean Marie Dubois** et **Vincent Fournée**, directeurs de recherche CNRS, à l'Institut Jean Lamour, Université de Lorraine\*.

\* Institut Jean Lamour, UMR 7198 CNRS/Université de Lorraine, École des Mines, Parc de Saurupt, CS14234, F-54042 Nancy.  
Courriels : Samuel.Kenzari@ijl.nancy-universite.fr, David.Bonina@ijl.nancy-universite.fr, Jean-Marie.Dubois@ijl.nancy-universite.fr, Vincent.Fournee@ijl.nancy-universite.fr



## Institut de Chimie des Substances Naturelles

Créé en 1959, l'ICSN est un laboratoire propre du Centre National de la Recherche Scientifique, où 51 chercheurs, 67 ingénieurs et techniciens, 80 étudiants et post-doctorants assurent le développement des recherches portant sur la chimie des composés originaires des substances naturelles.

Situé au sein du Campus du CNRS à Gif-sur-Yvette, l'Institut dispose d'un des meilleurs parcs RMN et Spectrométrie de Masse d'Europe, d'un équipement de pointe pour le développement de méthodologies de synthèses et d'une unité pilote de purification et de fermentation.

Deux médicaments antitumoraux actuellement sur le marché international : la Navelbine® et le Taxotère® sont issus des recherches de l'Institut et développés respectivement par les Laboratoires Pierre Fabre et les Laboratoires Sanofi-Aventis.

**Pour tout renseignement, dons, legs... contacter : Professeur Max MALACRIA, Directeur Institut de Chimie des Substances Naturelles**

CNRS

91198 Gif-sur-Yvette Cedex

Tél. : (33)1 69 82 30 89 - Fax : (33)1 69 07 77 52

E-mail : max.malacria@icsn.cnrs-gif.fr

