

FABRICATION ADDITIVE

Quand le laser fait parler

ALEXANDRE TAILLARD^[1]

Faisant appel à un laser de grande puissance pour fondre des poudres et former des pièces tridimensionnelles, le frittage laser révolutionne l'univers de la fabrication et par là-même celui de la conception des produits.

La technologie de frittage sélectif par laser (SLS, pour *selective laser sintering*) ou de fusion sélective par laser (SLM, *selective laser melting*) permet de créer directement à partir de poudres des objets fonctionnels sans avoir recours à aucun liant intermédiaire ou aucune étape complémentaire de finition. Les machines SLS/SLM peuvent fabriquer des objets à base de poudres de différents matériaux : métalliques, plastiques ou céramiques.

Le procédé SLS est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, conférant sa cohésion à la pièce. En réalité, ce frittage présente, presque toujours, une phase liquide, très minoritaire, aux joints de grains. Il permet de réaliser des pièces avec une grande précision (de 100 à 200 µm), mais avec une porosité importante, car la densification n'a pas eu le temps de s'effectuer.

[1] Élève ingénieur à l'ISAT de Nevers (58).

 Mots-clés

machine, matériaux, procédé, prototypage

Avec le procédé SLM, en revanche, tout le volume de matière sollicité par le faisceau laser passe à l'état liquide. Le liquide s'infiltrant par capillarité dans la partie non sollicitée de la poudre, la définition des surfaces de la pièce s'en trouve altérée. Ce procédé n'est donc pas adapté aux épaisseurs fines (inférieures à 0,15 mm pour les poudres métalliques, 0,3 mm pour les céramiques et 0,7 mm pour les pièces plastiques).

Pour simplifier, nous réunirons ces deux procédés sous le terme de *frittage laser*.

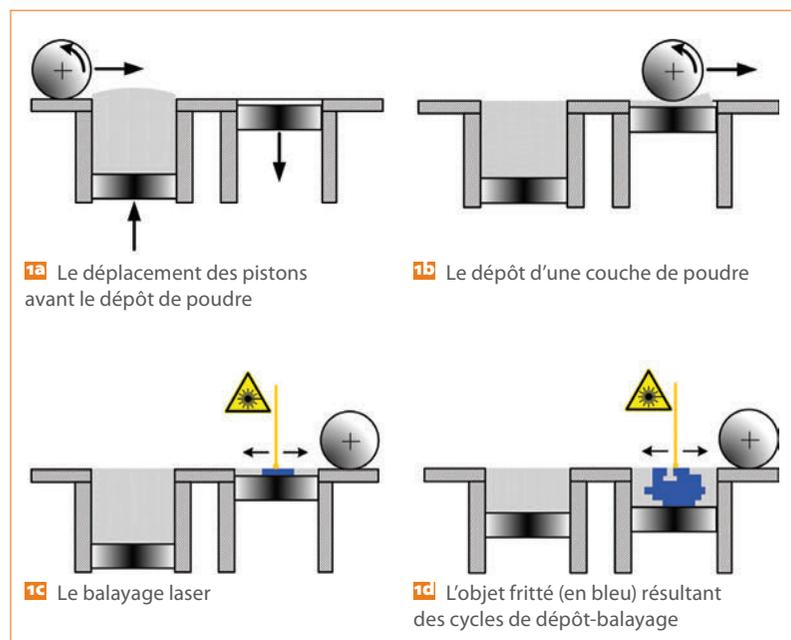
Le procédé

La figure 1 présente une architecture de machine SLS/SLM. Elle se compose d'une table comprenant deux conteneurs. Le fond de chaque conteneur est fait d'un piston mobile. Initialement, le conteneur gauche est rempli de poudre et le droit est vide avec le piston au niveau de la table. Le procédé commence par le dépôt d'une couche mince de poudre (de 20 à 100 µm) dans le conteneur droit. Pour cela le piston gauche est relevé et le piston droit est baissé de l'épaisseur de la couche 1a. Ensuite, un rouleau compacteur et racleur passe sur la poudre de gauche à droite 1b. Enfin la couche déposée est balayée par un faisceau laser 1c, qui provoque le chauffage local, la fusion puis la consolidation de la poudre.

Ce cycle de dépôt - balayage laser de la poudre est répété jusqu'à l'obtention d'un objet submergé dans la poudre non frittée 1d.

Les étapes de production sont les suivantes :

- Comme pour de nombreux procédés de prototypage rapide, la géométrie CAO de la pièce est tout d'abord décomposée en couches. Cette étape nécessite un logiciel *ad hoc* et un savoir-faire dans le positionnement de la pièce dans la cuve.
- Il peut être nécessaire d'ajouter des structures porteuses fines pour soutenir la géométrie en cours de construction 2.
- La machine va ensuite fusionner couche par couche la poudre par un faisceau laser. Les temps de réalisation sont encore relativement longs (plusieurs heures), et les cuves encore réduites en taille (de 200 à 300 mm de diamètre). Pour rentabiliser un « batch » (lot de pièces), on aura intérêt à réaliser le plus de pièces possible dans la cuve.
- La poudre non fusionnée est éliminée ; elle sera réutilisable pour fabriquer d'autres pièces 3.
- Une petite phase d'ébavurage des pièces est nécessaire pour éliminer les structures porteuses des pièces.



1 Le procédé SLS/SLM

la poudre

- Une phase de posttraitement (recuit de détente) est souvent nécessaire avant de détacher les pièces de la plaque embase pour les matériaux métalliques.

Les matériaux mis en œuvre

Tous les matériaux mis en œuvre se présentent en forme de poudre de granulométrie comprise entre 2 et 10 microns. La majorité des constructeurs de machines de frittage imposent leur poudre, dont ils sont propriétaires. Les machines ne sont pas forcément compatibles avec les poudres d'autres fournisseurs ; la dispersion granulométrique ne sera alors pas correctement maîtrisée.

Ces poudres extrêmement fines sont nocives pour l'homme et nécessitent le respect de règles de sécurité ; on les manipule avec des gants et des masques. Par ailleurs, les machines sont le plus souvent dans des salles grises, régulées en température et à l'abri des UV. En effet, la forme pulvérulente du matériau présente un risque d'explosion en cas de présence d'une source d'inflammation.

Il existe une assez grande variété de poudres ; passons en revue celles qui sont le plus usitées.

Les poudres métalliques

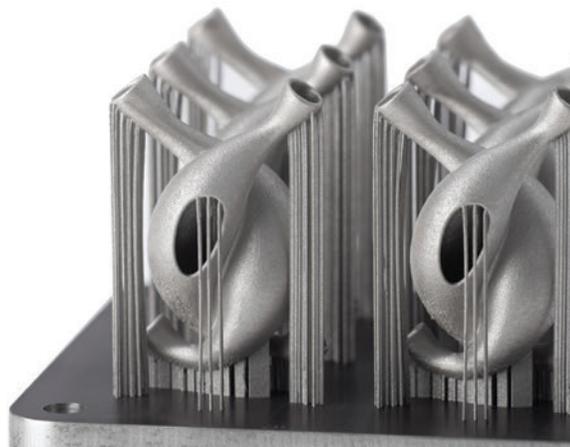
Quasiment tous les matériaux métalliques peuvent être réalisés par cette technologie : les alliages d'aluminium, les cuivreux, les aciers – inoxydables (Inox 904L/316L de granulométrie moyenne 7 microns), à outillage, à roulement –, les superalliages (chrome-cobalt de granulométrie moyenne de 8 μm), le titane ou les métaux précieux. Il faut cependant pouvoir disposer d'un approvisionnement en poudre métallique à la bonne nuance, ce qui peut poser problème en cas de matériau exotique. Diverses nuances appropriées aux usages courants sont normalisées au niveau international :

ISO 5755/1 : matériaux métalliques pour coussinets imprégnés de lubrifiants

ISO 5755/2 : fer et acier fritté contenant du carbone et/ou du cuivre

ISO 5755/3 : aciers au nickel, nickel-chrome, nickel-cuivre-molybdène, aciers inoxydables

La très grande liberté de forme, l'absence d'outillage, les bonnes tolérances de fabrication (précision de $\pm 50 \mu\text{m}$ pour 100 mm) et les bons états de surface (R_a de 10 μm) font du frittage laser une technologie très intéressante pour tester des prototypes avant



2 La présence de renforts pour soutenir le batch de pièces fabriquées



3 L'élimination de la poudre en fin d'opération

industrialisation ou pour réaliser des formes impossibles à obtenir par des technologies de transformation conventionnelles (usinage, forge...). Ses applications concernent pour l'essentiel des pièces unitaires ou en très petite série, à haute valeur ajoutée du fait de leur prix encore élevé. Il permet de réaliser :

- des prototypes fonctionnels ;
- des pièces unitaires (prothèses médicales, prothèses dentaires 4) ;
- des pièces irréalisables avec les procédés classiques 5 ;
- de la fabrication directe de petites séries (bijouterie haut de gamme) ;
- des outillages rapides ou de présérie (partie moulante de moules d'injection).

Ce procédé s'emploie déjà beaucoup dans la fabrication d'implants médicaux sur mesure, de pièces légères pour l'aérospatiale et les sports automobiles, d'échangeurs de chaleur efficaces, d'inserts pour moulage par injection avec canaux de refroidissement conformes. Complémentaire des technologies d'usinage conventionnelles, le frittage laser contribue de manière directe à réduire les délais de développement, les coûts d'outillage et le

volume de matière. De plus, permettant la création de structures complexes et de formes internes, il offre une plus grande liberté de conception.

Les poudres plastiques

Une grande variété de matières plastiques peut être mise en œuvre dans le frittage laser : les polyamides, les élastomères ou les polypropylènes .

Le frittage laser plastique permet, dans un grand nombre de domaines, de réaliser :

- des maquettes d'aspect (rendu volumique, style, ergonomie, design, architecture...);
- des prototypes fonctionnels .
- des pièces unitaires;
- des pièces irréalisables avec les procédés classiques;
- de la fabrication directe de petites séries (avec d'éventuelles modifications de conception, comme dans le cas du FinGripper que nous verrons plus loin).

Les poudres céramiques

Les principales céramiques utilisées sont l'alumine, la zircone, l'hydroxyapatite ou la mullite.

L'alumine est un oxyde d'aluminium servant dans de nombreuses applications de céramiques techniques. Elle a une bonne tenue mécanique aux températures élevées, une bonne conductivité thermique, une grande résistivité électrique, une grande dureté et une bonne résistance à l'usure. Elle est utilisée dans les pièces réfractaires et les pièces de friction.

La zircone est le nom commun de l'oxyde de zirconium (ZrO_2). Cette céramique technique d'aspect opaque a de très bonnes propriétés mécaniques à froid ainsi qu'à température élevée. Elle est utilisée industriellement pour des pièces de bouclier thermique, des pièces d'usure comme des billes de roulement, des lames de couteau, des pièces de joaillerie ou d'horlogerie (colorées) et des prothèses dentaires ou des têtes fémorales.

L'hydroxyapatite est le membre hydroxylé du groupe apatite. L'apatite de calcium est un matériau utilisé dans le biomédical pour la fabrication des substituts osseux. L'hydroxyapatite est la principale composante minérale de l'émail dentaire et de l'os. Elle est principalement utilisée dans le domaine médical des implants et des prothèses.

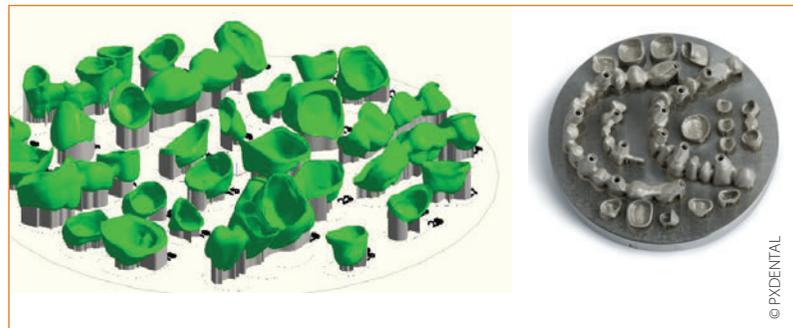
Le frittage laser céramique permet, dans les domaines de l'industrie, du médical et du luxe (joaillerie et horlogerie), de réaliser :

- des prototypes fonctionnels .
- des pièces unitaires;
- des pièces irréalisables avec les procédés classiques;
- de la fabrication directe de petites séries.

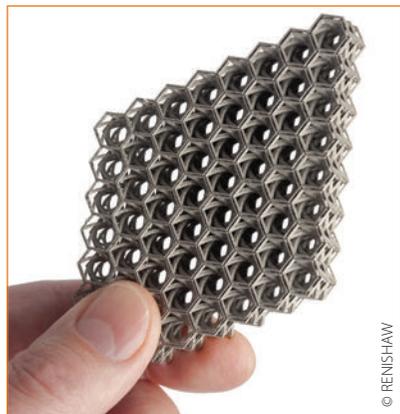
Les précisions dimensionnelles des pièces réalisées sont de $\pm 50 \mu m$ pour 100 mm.

La fabrication directe de pièces

Voici deux exemples de pièces, dites pièces bonne matière, la première en plastique, la seconde en aluminium, fabriquées directement par frittage laser :



4 Batch de prothèses dentaires, en phase de préparation et terminées, obtenues avec le procédé SLS



5 Pièce complexe réalisable uniquement par SLS

Le FinGripper

Le FinGripper bionique de Festo , pince inspirée d'une nageoire de poisson, a été créée de manière économique grâce à la méthode SLS. Toutes les pièces, doigts de préhension, vérins à soufflets, structure, supports articulés et biellettes, sont obtenues par frittage laser. De fines couches de poudre de polyamide (PA) de 0,1 mm d'épaisseur sont empilées sur une plate-forme, puis chaque couche est frittée par laser pour former un composant solide. Pour produire un lot de 150 FinGripper, Festo n'a besoin que de 24 heures après réception de la commande. La conception du produit, en particulier de toutes les liaisons mécaniques, est adaptée au procédé de fabrication directe. Le doigt de préhension du FinGripper  l'illustre bien. Il est constitué de 5 éléments, la pièce principale (l'enveloppe extérieure), déformable, et les quatre biellettes rigides en liaison pivot avec la pièce déformable . Ce sous-ensemble doigt est fabriqué en une seule opération de frittage sans se soucier des conditions d'assemblage et encore moins de démontage des 5 éléments constitutifs. Cette conception ainsi que la minimalisation de la matière ont permis de réduire le poids de près de 90 % par rapport à une pince en métal classique, ce qui confère au préhenseur un fonctionnement très efficace énergétiquement.

		Polyamide PA12	Polyamide (PA) chargé verre	Thermoplastique élastomère	Polypropylène (PP)
Caractéristique du procédé SLS	Précision dimensionnelle standard en mm	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1
	Épaisseur minimale des parois en mm	0,7	0,7	0,7	0,7
Caractéristique après frittage	Masse volumique après frittage en g/cm ³	0,97	1,49	0,44	0,84
	Point de fusion T _m en °C	180	185	192	163
	Résistance à la traction à la rupture R _m en MPA	44	26	1,8	21
	Module d'Young (module d'élasticité longitudinal) en MPA	1 600	5 900	7,5	1 500
	Domaines d'application	Pièces soumises à de fortes contraintes thermiques et mécaniques Matériau biocompatible (charnières, clips, instruments chirurgicaux...)	Pièces très rigides, résistantes aux hautes températures et aux chocs Pièces usinables (capots, boîtiers...)	Pièces flexibles résistantes à la chaleur (joints, tuyaux flexibles, chaussures de sport...)	Prototypes à grande endurance et emboîtement élastique, présentant les propriétés effectives du polypropylène

6 Les caractéristiques des poudres plastiques

● Un échangeur de chaleur

Le frittage laser (ici, SLM) permet de créer toutes les cavités à l'intérieur de l'échangeur en aluminium ¹² sans aucune limitation de forme ou de section de passage ¹³. Il est typiquement adapté aux pièces complexes fabriquées en petite série et intégrant des canaux internes de refroidissement ou de chauffage, souvent irréalisables par un autre procédé, comme celle-ci.

L'outillage rapide

Le frittage laser de poudre métallique est notamment utilisé pour la fabrication rapide d'outillage prototype ou de présérie. Il permet en effet un gain de temps important sur la réalisation d'empreintes de moules complexes pour moulage par injection et coulée sous pression ¹⁴ avec :

- un bon état de surface ($R_a < 10 \mu\text{m}$) ;
- une matière compatible avec des opérations ultérieures d'usinage, d'électroérosion et de polissage ;
- une grande dureté de surface (20 HRC sans traitement thermique) ;
- une excellente conductivité thermique.

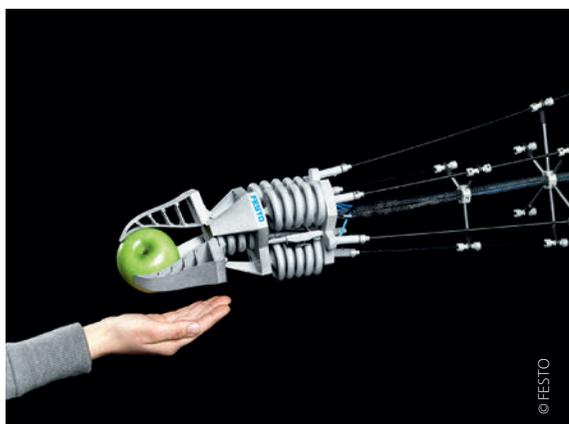


7 Prototype fonctionnel réalisé sans frais d'outillage



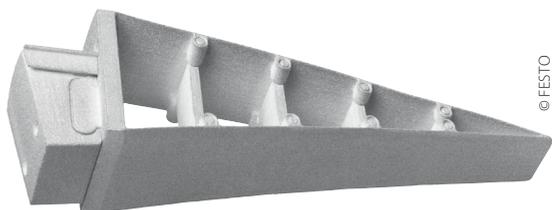
© 3DCERAM

8 Prototype « bonne matière » pour tester le concept et le valider dans des conditions réelles



© FESTO

9 La pince FinGripper, constituée exclusivement de pièces frittées



© FESTO

10 Le sous-ensemble doigt...



© FESTO

11 ... déformable et articulé



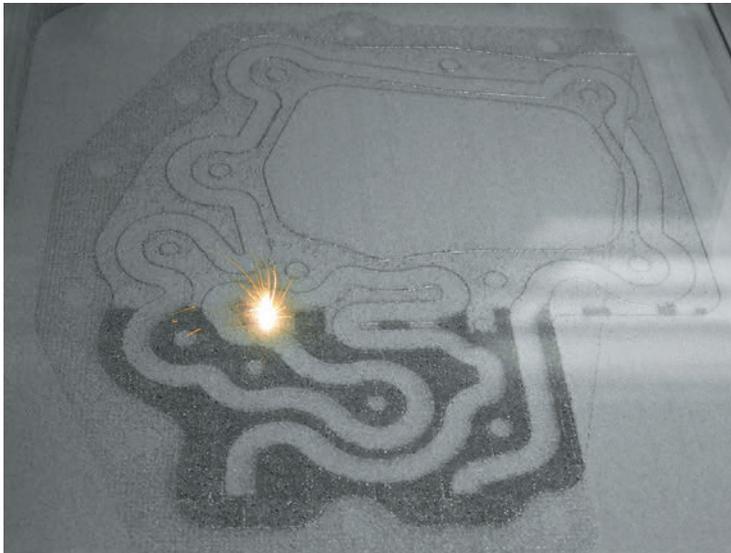
© FESTO

12 Échangeur de chaleur de 2,5 kg réalisé par SLM de poudre d'aluminium

Deux poudres de même granulométrie peuvent être utilisées pour les empreintes de moule : bronze et acier. Le matériau idéal est choisi selon que le facteur décisif est la vitesse de fabrication, la résistance des empreintes ou la qualité des surfaces obtenues. L'application principale de cette technologie est la fabrication rapide d'outillage pour l'injection de matières plastiques. Des canaux de refroidissement ayant des formes complexes peuvent être spécialement dessinés et inclus dans la fabrication. Il est donc possible de créer des canaux qui suivent au mieux la forme de la pièce à injecter, ce qui, lors de l'injection, permettra de diminuer les temps de cycle. Cette technique permet de repousser certaines limites d'usinage. Il est même possible de combiner plusieurs technologies dans une carcasse, empreintes frittées par laser et éléments fabriqués de manière traditionnelle.

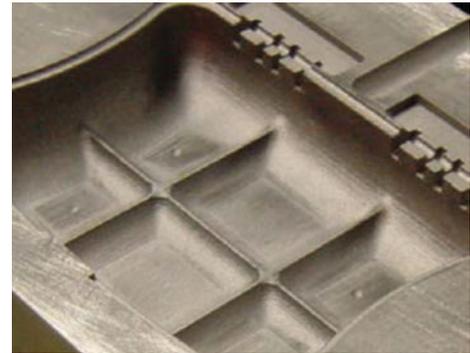
La plupart des matières plastiques peuvent être injectées dans ces empreintes frittées, et ce, pour des séries allant jusqu'à plusieurs milliers ou dizaines de milliers de pièces. Le principal avantage de cette technologie est la possibilité de réduire de façon drastique les délais de fabrication d'outillage « prêt à mouler » 15, à moins de trois semaines dans la plupart des cas, ce qui ouvre de nouvelles perspectives dans le développement de produits. Ce procédé est aussi particulièrement bien adapté à la fabrication d'outillage pour la coulée en coquille d'aluminium, de magnésium ou de zinc de présérie, l'injection de pâte métallique et céramique pour des petites séries de pièces, et la vulcanisation, l'emboutissage ou le formage de feuilles métalliques.

Repoussant les limites imposées par les procédés traditionnels (usinage, fonderie, soudure, assemblage, injection, collage, etc.), le frittage laser est une innovation technologique majeure, dont la diffusion est étroitement liée à l'essor des technologies de digitalisation, de conception et de fabrication des formes 3D (scanning/CAO/FAO). Son succès repose sur l'optimisation de trois paramètres essentiels en fabrication mécanique 16 :

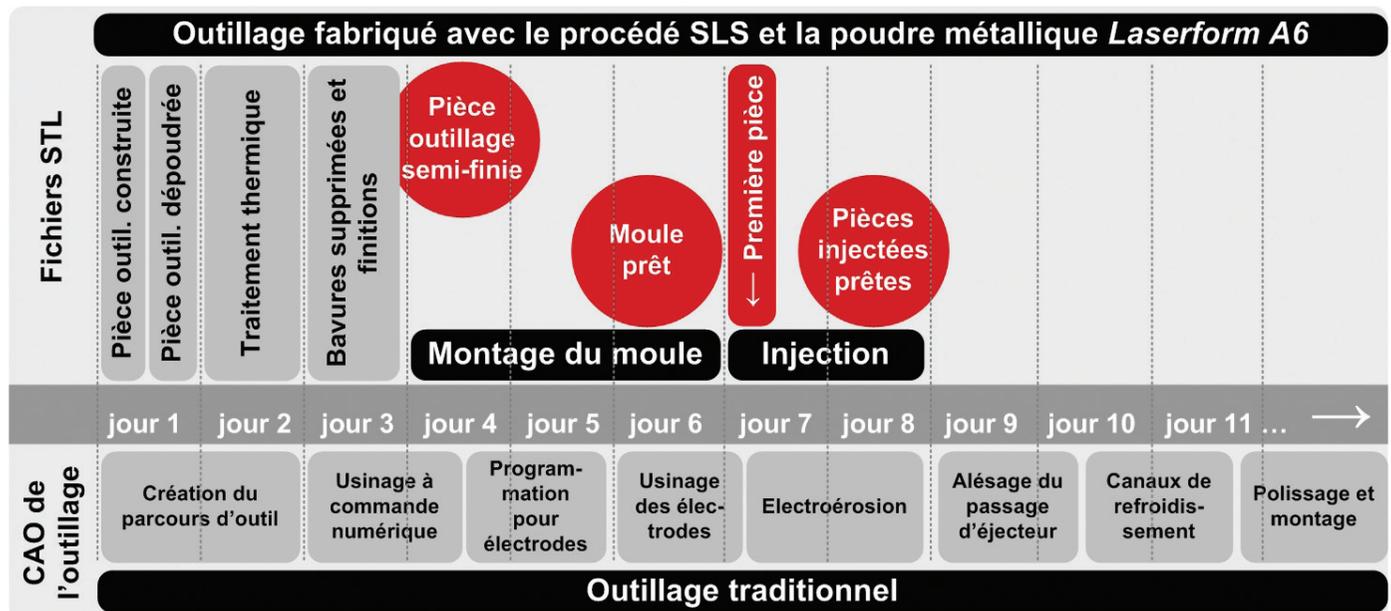


13 Échangeur de chaleur en cours de fabrication.

Le matériau est liquéfié au lieu de la focalisation du faisceau laser, là où la matière de la future pièce doit exister



14 Empreinte de moule d'injection réalisée avec une poudre métallique de type acier ($R_m = 470$ MPA)

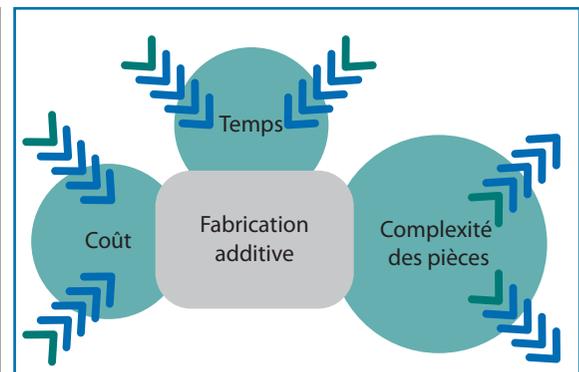


15 Exemple de production d'outillages en métal en moins de 4 jours avec le matériau LaserForm A6 de 3D Systems, par rapport à plus de 11 jours pour préparer des empreintes de moule traditionnel

- le temps, par la réduction des phases de développement et de fabrication des produits ;
- le coût, grâce à des outillages moins onéreux et surtout moins nombreux ;
- la complexité des formes.

Naguère réservé à la réalisation de prototypes, il permet maintenant de produire des pièces semi-finies ou finies directement utilisables. Certains systèmes autorisent des productions en série, ce qui explique l'adoption croissante de ce procédé dans l'industrie.

Toutefois, pour chaque projet, il est nécessaire de travailler avec des spécialistes qui maîtrisent les procédés afin qu'ils puissent analyser l'impact de tous les paramètres de la poudre – granulométrie, forme de particules, composition chimique, recyclage – et du frittage laser – stratégie et vitesse de balayage, puissance et focalisation du laser, température de fonctionnement, mise en couche, etc. Il est important également que le partenaire du



16 L'optimisation des trois paramètres de la fabrication

projet puisse garantir les caractéristiques et propriétés métallographiques, mécaniques, de précision dimensionnelle de fabrication, d'état de surface et de porosité des produits finals élaborés. ■