

Fabrication Additive Métallique

Conseils et bonnes pratiques
pour la fusion laser



Foto: © Netzwerk Strahlschmelzen

Table des matières

Résumé.....	3
Abréviations.....	3
1 Identifier le potentiel spécifique à l'entreprise pour la fabrication additive	4
2 Choix de la bonne stratégie de fabrication	6
3 Comment acheter une machine	7
4 Comment former ses équipes	10
5 Limiter le nombre de matériaux par machine.....	12
6 Ne pas négliger les pré et post-traitements	13
7 Assurer la sécurité en particulier pour les poudres métalliques et les gaz industriels	15
8 Sélectionner le gaz et l'approvisionnement optimal pour le procédé.....	17
9 Gérer la qualité commence avec la poudre	19
10 Gérer votre processus FA pour assurer la qualité des pièces.....	21
Demandez aux experts	24
Références.....	26

Avertissement :

Air Liquide France Industrie et l'Institut Fraunhofer IWU, Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz, Allemagne en tant qu'entité constitutive de la Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eV, HansasträÙe 27 c, 80686 Munich (ensemble les Parties), proposent les informations de ce document. Les Parties proposent dans ce document des informations provenant de sources qu'ils estiment exactes et fiables. Cependant, en raison d'éventuelle erreur humaine ou imputable à d'autres facteurs, toutes les informations contenues dans ce document sont fournies sans aucune garantie. Les Parties adoptent toutes les mesures nécessaires pour que les informations fournies soient aussi fiables que possible. Dans la mesure permise par la loi, les parties déclinent toute responsabilité pour toute perte ou dommage direct ou compensatoire causés à toute personne ou entité, découlant des informations contenues dans le présent document.

Dispositions générales :

Air Liquide SA et/ou ses Sociétés affiliées (" Air Liquide") déclinent toute responsabilité quant à l'utilisation et aux conséquences de l'utilisation des informations contenues dans ce document. Air Liquide ne donne aucune garantie quant aux informations contenues dans ce document et n'assume aucune responsabilité par rapport aux informations ou suggestions contenues dans le présent document.

Les informations contenues dans ce document reposent sur les informations techniques et les expériences dont dispose actuellement Air Liquide. Ce document ne saurait être confondu avec les réglementations (nationales ou européennes) où les dispositions légales.

Air Liquide se réserve le droit d'ajouter de supprimer ou de modifier totalement ou partiellement les informations contenues dans ce document.

Toute copie ou reproduction partielle ou intégrale de ce document est strictement interdite sans autorisation écrite préalable d'Air Liquide.

Air liquide détient, se réserve et conserve tous les droits de propriété, y compris les copyrights du présent document.

Ce document et toutes les photographies ou images contenues dans celui-ci ne pourront être (1) copiés ou reproduits (2) vendus, prêtés, cédés ou distribués de toute autre manière à des tiers (3) utilisés pour un objectif ou d'une manière qui soit contraire aux intérêts d'Air Liquide. Les marques de fabrique, marques de service, appellations commerciales, logos et autres indications d'origine contenus dans ce document sont des marques déposées ou non d'Air Liquide ou d'une tierce partie ayant octroyé à air Liquide le droit de les utiliser. L'utilisation de tout matériel protégé par un copyright et ou des marques de fabrique exige l'approbation écrite Air Liquide sur un formulaire d'autorisation séparé.

Résumé

La fabrication additive (AM) - ou impression 3D industrielle - prend de l'ampleur à mesure qu'elle évolue vers de la production en série. La fusion par faisceaux laser est devenue une technologie prometteuse, les premiers acteurs bénéficiant déjà d'un avantage concurrentiel considérable. De plus en plus d'entreprises souhaitent bénéficier de son potentiel économique et technologique. Cependant, beaucoup cherchent à introduire la fabrication additive de la manière la plus efficace possible. Ce livre blanc propose les meilleures pratiques pour bénéficier de tout le potentiel de la fabrication additive et mettre en lumière la façon de configurer et de gérer efficacement votre production.

Ce livre blanc est pour vous, si :

- Vous avez l'intention d'introduire la fabrication additive - et en particulier la fusion laser - dans votre entreprise.
- Vous êtes intéressés par les conseils

clés pour une intégration réussie de votre installation en production.

- Vous êtes à la recherche des "bonnes pratiques" pour vos procédés.

Ce travail est le résultat d'un travail collaboratif entre Air Liquide et l'Institut Fraunhofer. Nos entreprises collaborent pour développer de nouvelles idées et technologies pour la fusion sélective par laser et partagent l'objectif de promouvoir l'utilisation de la fabrication additive pour des applications industrielles.

Leadership et coordination : Markus Effinger et Bernhard Müller

Co-auteurs:

- Air Liquide : Francis Briand, Coralie Charpentier, Marie-Caroline Dick, Markus Effinger, Fabien Januard,
- Fraunhofer : Richard Kordaß, Bernhard Müller, Thorsten Schnabel.

Abréviations

FA	Fabrication Additive	CNC	Commande Numérique par Calculateur
LBM	Laser Beam Melting - Fusion par Faisceau Laser (autres appellations utilisées : selective laser melting, direct metal laser sintering, et laser metal fusion)	API	Automate Programmable Industriel
CAO	Conception Assistée par Ordinateur	STL	Stéréolithographie
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur	VRML	Langage de Modélisation de Réalités Virtuelles

1 Identifier le potentiel spécifique à l'entreprise pour la fabrication additive

Pour identifier les applications FA potentielles dans votre entreprise, il est important de connaître le procédé FA que vous souhaitez introduire. Consultez la documentation (scientifique) et impliquez des experts pour obtenir une base de connaissances appropriées sur le procédé de FA.

Dès que vous aurez assimilé les bases du procédé FA, l'étape suivante consistera à passer en revue tous les procédés de production utilisés par votre entreprise (par exemple, les produits, les outils, les gabarits). Pour tirer le meilleur parti de la FA, il est nécessaire de repenser et de redessiner des pièces entières. Sans cette étape de re-conception, vous ne pourrez que reproduire les pièces conçues pour d'autres technologies de fabrication conventionnelles (par exemple fraisage / usinage, perçage,

tournage ...), et vous passerez à côté des avantages de la fabrication additive. Un exemple réussi de réduction de poids avec les nouvelles possibilités offertes par FA est d'intégrer des structures en treillis dans une pièce à des fins d'allègement. (VOIR LA FIGURE 1).

La FIGURE 2 illustre comment améliorer les fonctions d'une pièce avec des systèmes de canaux à flux optimisé pour le refroidissement conforme (BLEU) ou par intégration de capteur (VERT).

Lorsque des pièces potentielles sont identifiées, une nouvelle conception spécifique à la FA doit suivre. Le principal défi est de repenser et de remettre en question tous les aspects de la conception avec en premier lieu l'utilisation des pièces, de rassembler



FIG. 1 Axe de planche à roulettes léger optimisé pour la topologie avec aperçu de la structure en treillis
SOURCE: PHILIPP MANGER

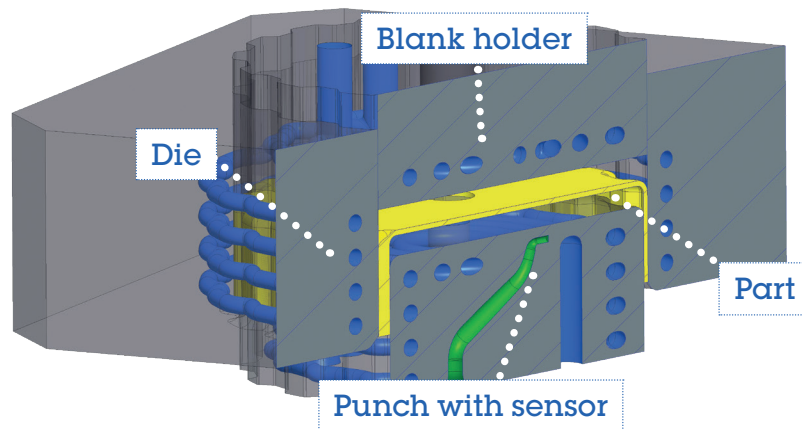


FIG. 2 Outil de formage à chaud avec des canaux de refroidissement conformes et un thermocouple (Copyright: Fraunhofer IWU)

des personnes de différents départements (par exemple, production, maintenance ...) et de tirer parti de puissants outils de calcul. Certaines entreprises sont spécialisées dans la conception et / ou le prototypage et disposent donc d'outils spécifiques. Si

votre entreprise n'a pas les capacités ni les outils de conception appropriés, il pourrait être avantageux de coopérer avec des entreprises spécialisées pour bénéficier de leur savoir-faire et de leurs outils assez spécifiques.

Pour identifier le potentiel de FA dans votre entreprise, pensez aux points suivants :

Pouvez-vous combiner des pièces?

→ Réduire le temps de montage en ne construisant qu'un seul produit complexe

Pouvez-vous appliquer des conceptions plus légères?

→ Pour réduire le poids et les coûts

Pouvez-vous intégrer des fonctions supplémentaires?

→ Systèmes de canaux, capteurs, autres caractéristiques qui ne peuvent être fabriquées que par LBM

Pouvez-vous remplacer les flux de production actuels?

→ Avec LBM vous pouvez directement produire des pièces à partir des données 3D-CAD

Pouvez-vous introduire de nouveaux designs qui ne peuvent être fabriqués qu'avec LBM?

→ Nouveaux produits

Devriez-vous passer de l'achat à la fabrication de certaines pièces?

→ Pièces de rechange, pièces avec de longs délais

Pourriez-vous apporter plus de valeur aux pièces qui sont actuellement des pièces standards et qui pourraient être personnalisées, mais produites en série.

→ Valeur supplémentaire au client

2 Choix de la bonne stratégie de fabrication

Sur la base du potentiel spécifique à l'entreprise pour la fabrication additive, il est nécessaire de définir une feuille de route de l'entreprise pour sa mise en œuvre. Cette feuille de route devra inclure la planification de l'idée jusqu'à la fabrication. Elle doit englober l'organisation et la configuration de l'équipe, la formation des employés, la gestion du changement et le développement technologique. Cela vaut la peine de recruter ou d'embaucher des professionnels expérimentés pour prendre en charge et faciliter l'implémentation de ce process.

Un aspect important d'une telle feuille de route est la stratégie de fabrication. Même dans la phase initiale de prototypage, la production de pièces est essentielle pour améliorer la conception à travers un certain nombre d'itérations. Comme les volumes sont généralement faibles à ce stade, il peut être intéressant d'engager un prestataire de services. Cela limite l'investissement initial et vous permet de vous appuyer sur un savoir-faire de fabrication établi, ce qui se traduit par un cycle de développement rapide. D'un autre côté, la mise en place d'une unité de production interne à l'échelle du laboratoire favorise le développement de votre propre expertise et peut faciliter la future mise en place de la production interne.

La question de l'externalisation de la fabrication de pièces finales est également pertinente pour la production en série. Il y a des exemples réussis d'entreprises qui dépendent entièrement de fournisseurs de services externes alors que dans d'autres cas, les entreprises réalisent avec succès leurs propres installations de production additive. Même des formes hybrides com-

me des coentreprises avec un prestataire de services sont des options viables. En fin de compte, une telle décision doit prendre en considération le volume de production, la rapidité de mise en œuvre, les ressources internes et les capacités ainsi que les critères économiques.

Une stratégie de fabrication exemplaire peut consister à commencer par une collaboration avec un prestataire de service pour la fabrication de prototypes. À un stade ultérieur, la location d'un certain nombre d'heures de travail auprès du prestataire de services peut être une option pour acquérir du savoir-faire et de l'expérience dans des cycles de production pilotes. La production en série est finalement effectuée dans une installation interne pour les matériaux principaux (par exemple l'acier inoxydable) tandis que les pièces constituées d'autres matériaux de niche (par exemple le titane) sont toujours produites par les prestataires de services.

3 Comment acheter une machine

Lorsque vous achetez une machine LBM, il y a beaucoup de choses à considérer. La décision d'achat est complexe car en plus d'acheter une machine avec certaines caractéristiques, c'est souvent une décision associée à un écosystème particulier qui peut inclure la fourniture de poudre et de conseil.

Il y a aussi des machines avec de très petites chambres de construction sur le marché, par ex. Celles de OR Laser. Celles-ci sont souvent utilisées à des fins de recherche et de développement, mais aussi pour des applications spécifiques avec de petites pièces et une préférence pour les cycles de construction courts (par exemple dentaires). L'utilisation de machines multi-laser peut augmenter considérablement le taux de construction par heure. D'un autre côté, les taux horaires de la machine peuvent être le double d'une machine à simple laser, ce qui réduit l'avantage de coût d'une vitesse de traitement plus rapide (VOIR FIGURE 4).

Le matériau des pièces que vous voulez fabriquer doit être en corrélation avec la taille de la chambre de construction de la machine, car certaines grandes machines ne peuvent pas traiter tous les types de poudre de matériaux. Par exemple, l'acier maraging (1.2709), qui est très commun pour les machines de petite et surtout de taille moyenne, n'est pas (encore) disponible pour les grandes machines (par exemple Concept Laser X-line 2000R³ ou EOS M400⁴).

Et enfin, parlons coûts. Il existe une large gamme de petites machines de fabrica-

tion qui coûtent environ 500k EUR, jusqu'à des plus grandes machines avec de grandes chambres pouvant coûter plus de 1.500k EUR.

Pour mettre en place une chaîne de fabrication additive, des équipements de pré et post traitements et des consommables sont nécessaires. Généralement, les fabricants de machines offrent une gamme de produits appropriés allant du logiciel de CAO 3D à l'approvisionnement en poudre métallique jusqu'aux fours de traitement thermique intégrés. En tant que tels, ces fabricants de machines fournissent un écosystème qui doit également être pris en compte lors du processus d'achat de la machine. Comme ces aspects périphériques n'obtiennent souvent pas l'attention qu'ils méritent, ils seront abordés plus en détail au POINT 6.

Les fabricants de machines ont également différentes approches pour transporter le matériau en poudre. Les systèmes entièrement automatisés sont principalement utilisés pour les cycles de production en série. Dans un système entièrement automatisé, la poudre est transportée par des canalisations vers une station de tamisage pour y être nettoyée. Ensuite, elle est de nouveau introduite dans la machine LBM pour une nouvelle réalisation. Il n'est pas facile de changer la poudre avec un tel système. Le système de transport de poudre le plus courant utilise des conteneurs, où la poudre est transportée vers la station de tamisage et de nouveau vers la machine. Ce processus nécessite de la main-d'œuvre. Avec le système de conteneur, un changement de poudre sur la machine est possible,

bien que généralement évité en raison de la contamination croisée avec des résidus de poudre et pour des raisons économiques (VOIR CONSEIL 5).

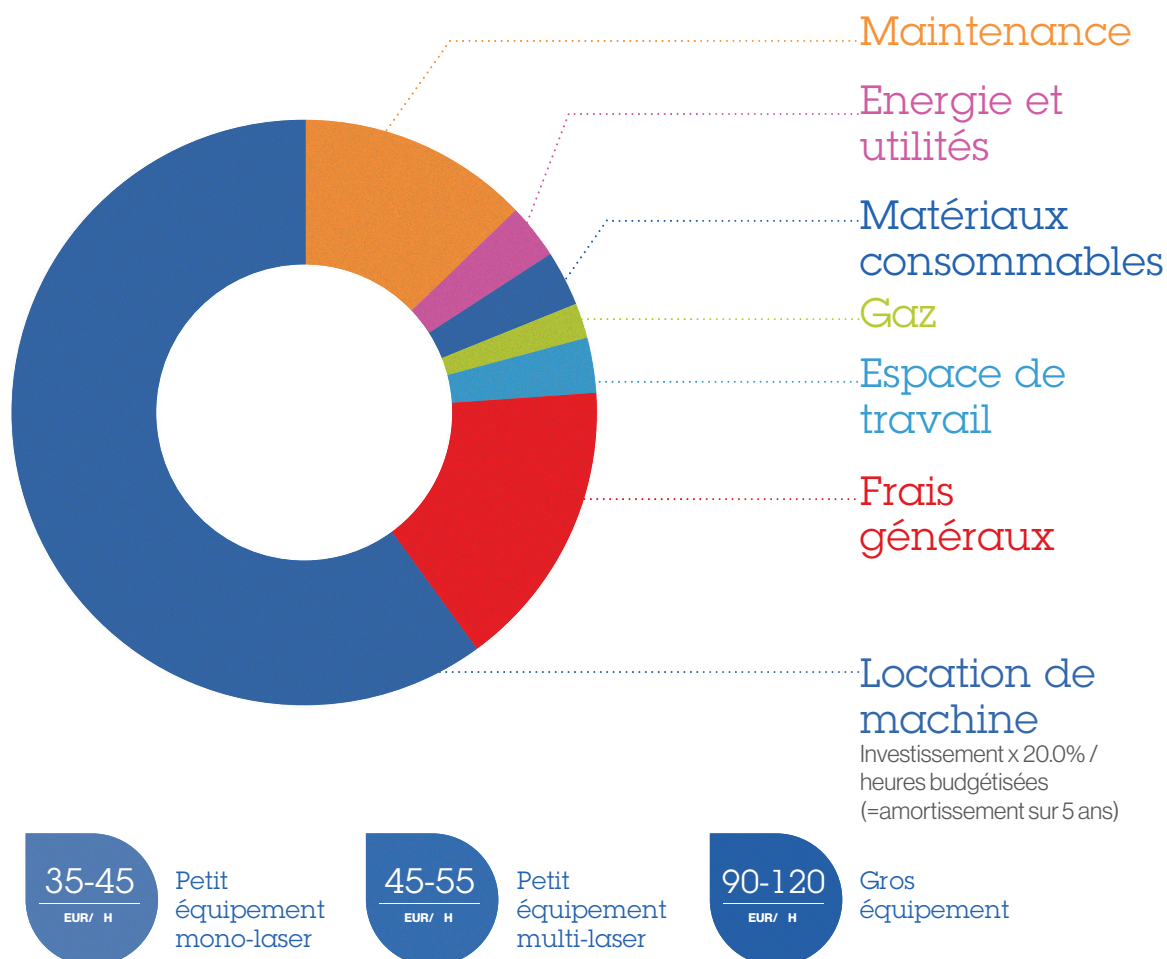
Sur la base des critères mentionnés ci-dessus, une analyse comparative des machines présélectionnées doit être effectuée. Il est judicieux de commencer par un design aussi proche que possible de celui que l'on veut construire et de comparer les différentes machines en termes de qualité (rugosité de surface, porosité, etc.) et de bilan économique (vitesse de construction, coût machine, flexibilité, etc.). Comme le processus de décision peut être complexe et

comprend généralement des paramètres qui ne sont pas évidents pour les utilisateurs débutants, il est généralement avantageux d'impliquer un expert.

Le test final d'acceptation sur le site du fabricant ou de la machine du client doit être constitué d'une ou de plusieurs pièces pilotes, telles que définies dans le processus d'étalonnage, qui doivent remplir certains critères.

Taux horaires des machines

ÉTUDE ROLAND BERGER 2016



En regardant simplement les caractéristiques de la machine, l'une des principales variables est la dimension de la chambre de construction. Cette variable doit être choisie avec soin, car elle définit les limites des dimensions de la pièce pouvant être fabriquées avec la machine. Les plus courantes sont les petites machines à un ou plusieurs lasers et les dimensions de la chambre

de construction allant de 250x250x300 à 280x280x350 mm³. Pour fabriquer des pièces plus grandes, il existe de grandes machines avec jusqu'à quatre lasers et une dimension de chambre de construction allant jusqu'à 800x400x500 mm³ (VOIR FIGURE 3).

Petit équipement mono-laser

- Classe d'équipement à coût d'investissement **le plus faible**
- **Faible productivité** qui contrebalance le prix bas de l'équipement

Exemple de configuration :

Investissement	EUR > 0.5 m
Capacité production (IN718)	10 - 15 cm ³ / h
Chambre	250x250x300 280x280x350 mm



M2 cusing



EOS M 290



SLM 280 Twin



M2 cusing
Multilaser

Petit équipement multi-laser

- **Productivité élevée** grâce à 2 lasers à **prix encore modéré**
- Adapté à la production en **série de petites pièces**

Exemple de configuration :

Investissement	EUR > 0.5 m
Capacité production (IN718)	10 - 15 cm ³ / h
Chambre	250x250x300 280x280x350 mm

Gros équipement

- **La plus haute productivité** en utilisant jusqu'à 4 lasers
- Permet la production de pièces **plus grandes ou lots de plus grandes tailles**
- Concepts **d'automatisation** disponible

Exemple de configuration :

Investissement	EUR > 0.5 m
Capacité production (IN718)	10 - 15 cm ³ / h
Chambre	250x250x300 280x280x350 mm



X LINE 2000R



SLM 500



EOS M 400

FIG. 3 (AU DESSUS)

Vue d'ensemble des types de machines LBM
SOURCE: ROLAND BERGER 2016⁵⁾

FIG. 4 (GAUCHE)

Taux horaires pour différents types de machines
SOURCE: ROLAND BERGER 2016

4 Comment former ses équipes

La connaissance est la clé. La fabrication additive n'étant pas encore établie comme une pratique industrielle usuelle, des opportunités de formation, ainsi qu'une formation professionnelle spécifique pour les techniciens et opérateurs de machines en FA sont en train d'émerger. Conséquence de la forte demande actuelle, un certain nombre d'initiatives et programmes de formation ont été lancés. Bien qu'ils soient loin de satisfaire les besoins de formation futures des spécialistes en FA dans l'industrie, ils offrent la possibilité d'envoyer des membres avec l'expérience appropriée dans des domaines de travail comparables (par exemple usinage CNC et programmation, CAO 3D / CAM, technologie laser ou similaire) à tous ces cours et programmes de formation AM. En outre, un certain nombre d'ateliers et de séminaires sur la FA sont offerts, certains d'entre eux avec un focus particulier (par exemple, aérospatiale ou automobile, contenu spécifique à un matériel ou à une technologie, conception pour FA, etc.). Souvent, le contenu est proposé sous forme de présentations, ou conférences sans éléments pratiques ou très limités. Elles com-

prennent généralement un ou deux jours de formation (parfois jusqu'à quatre jours), ce qui n'est certainement pas suffisant pour acquérir des connaissances et des qualifications de base approfondies.

Vous pouvez également utiliser des plateformes locales (associations professionnelles, plateformes gouvernementales, universités ...) pour louer une machine pendant quelques heures / jours afin de développer progressivement l'expertise et bénéficier du savoir-faire des techniciens locaux. Une bonne formation en post-traitement (par exemple traitement thermique, finition manuelle, post-usinage CNC, grenailage, etc.) devrait également faire partie du programme de formation.

Organismes impliqués dans la Fabrication Additive en France

Formation

Institut de Soudure (IS)

www.isgroupe.com

Plateformes de R&D collaboratives

Plusieurs plateformes collaboratives permettent de vous accompagner.

Consultez-nous pour obtenir la liste.

Associations

Association Française du prototypage rapide (AFPR)

www.afpr.asso.fr

Le Syndicat des machines et technologies de production (SYMOP) à travers son "Portail de l'offre de fabrication additive en France" présente une cartographie de la chaîne de valeur de la filière française et ses acteurs.

www.la-fabrication-additive.com

5 Limiter le nombre de matériaux par machine

En ce qui concerne le coût de fabrication, l'utilisation efficace de la machine de fusion laser sélective est cruciale. Ceci est démontré par le fait que le coût horaire calculé de la machine basée sur la dépréciation et l'amortissement peut représenter plus de 50% du coût total.

Changer de matériau pour une machine prend généralement beaucoup de temps et nécessite un effort de main d'oeuvre important. La durée typique d'un tel changement de matériau (par exemple de l'aluminium à l'acier inoxydable) nécessite environ 1,5 jour de nettoyage manuel. Pendant cette période, la machine n'est pas disponible

pour la production alors que les coûts de main-d'oeuvre continuent d'augmenter. En outre, il existe un risque de contamination car certains résidus de poudre resteront dans la machine. Pour un résultat optimum et une production la plus économique, une machine devrait être dédiée à un seul matériau. Si cela n'est pas possible, réduisez autant que possible les changements de matériau. Une autre option consiste à externaliser la fabrication de pièces avec des matériaux rarement utilisés (VOIR AUSSI CONSEIL 2).

6 Ne pas négliger les pré- et post-traitement

Lors de l'implémentation de la fabrication additive dans une organisation, il est crucial de prendre en compte l'ensemble de la chaîne de process autour de la FA. Souvent, les pré et post-process encadrant la fabrication additive n'obtiennent ni l'attention ni la considération qu'ils méritent depuis le début (comparaison d'une pièce construite et d'une surface fonctionnelle post-traitée, VOIR FIGURE 5). Ce chapitre décrit les pré et post-traitements les plus pertinents pour la FA.

Le pré-traitement se concentre sur la chaîne de traitement de données CFAO. Il commence par un puissant système de CAO 3D à utiliser pour concevoir les pièces, les composants et les outils à fabriquer via la FA. Ce système de CAO 3D doit inclure une interface pour exporter les données lisibles

pour la FA. Le format d'interface le plus courant pour la FA est le STL, une description triangulée de la surface 3D, tandis que certaines imprimantes 3D peuvent également importer d'autres formats tels que VRML (comprenant les informations de couleur). Il existe des différences significatives dans la qualité de la sortie STL des différents systèmes de CAO 3D - ceci devra être testé et vérifié à un stade précoce, peut-être même avant l'acquisition du logiciel de CAO 3D.

Alors que certaines imprimantes 3D, principalement dans le traitement des polymères, incluent un logiciel de prétraitement pour utiliser directement les données STL, la plupart des systèmes - en particulier dans l'impression 3D métallique - nécessitent un logiciel de FAO spécifique à la FA. Dans ce logiciel, les données STL sont traitées pour placer les modèles 3D dans leur position de construction, générer la structure de support nécessaire, découper le modèle 3D en couches 2D, générer des chemins d'impression (par ex. ou mouvement de la buse) et enfin exporter ces données dans des formats spécifiques au système de FA. Ces données sont ensuite importées dans la machine de FA pour démarrer le travail de construction. Alors que de nombreux processus décrits ci-dessus sont semi-automatiques, il est toujours nécessaire de disposer d'un personnel expérimenté pour traiter correctement les données 3D afin de réussir un travail d'impression. Cette expérience est requise par ex. pour une orientation de construction appropriée, basée sur plusieurs critères (temps de construction



FIG. 5 Tige de hanche fémorale MUERTO® telle que construite (à gauche) et avec surface fonctionnelle polie (à droite)⁷⁾

COPYRIGHT: FRAUNHOFER IWU

minimal, qualité de surface locale et précision dimensionnelle, nombre maximum de pièces dans un batch de construction, etc.) et pour la génération de structures de support (structure de support à la surface de la pièce, force maximale du support pour fixer la pièce pendant les travaux de construction, éviter la rupture et l'arrachement de la structure support pendant la construction).

De nos jours, des étapes de prétraitement plus complexes et plus avancées émergent, notamment la simulation process (pour pouvoir prédire et minimiser les contraintes internes et la distorsion) et la planification

de plusieurs jobs de construction (pour la production FA à plus grande échelle - de nombreuses pièces à produire, plusieurs machines de FA fonctionnant en parallèle).

Après l'opération d'impression 3D, les pièces AM ont généralement besoin d'un post traitement. Aujourd'hui, cela comprend encore beaucoup de travail manuel, qui impacte également de manière significative le coût total des pièces et de la production.

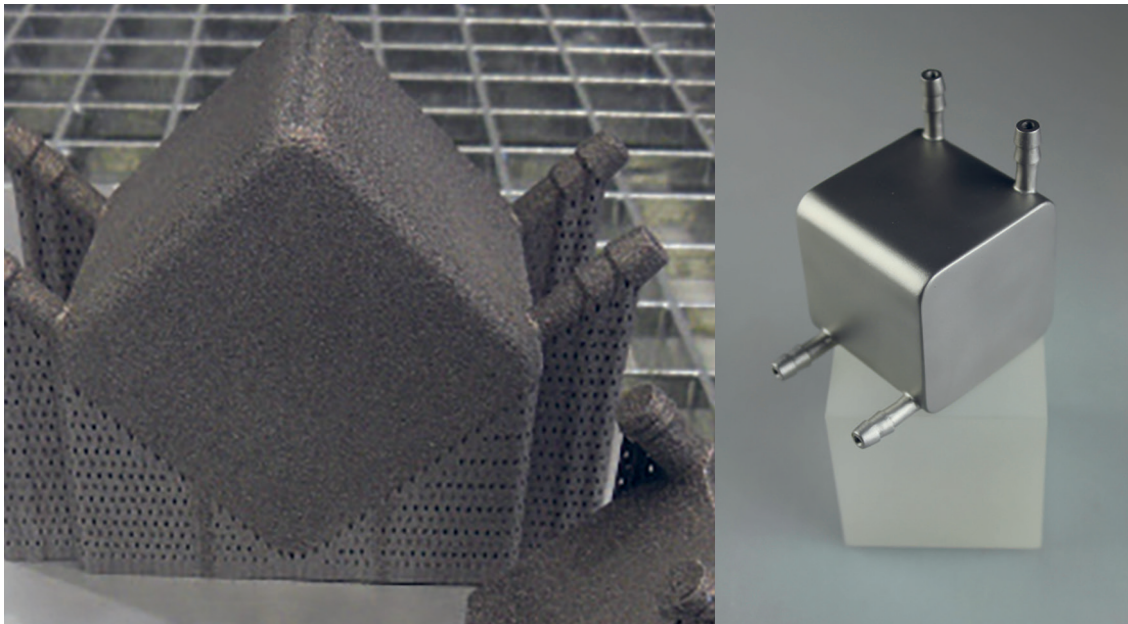


FIG. 6 Qualité de surface du composant après LBM (à gauche) et après finition (à droite)⁸⁾

COPYRIGHT: FRAUNHOFER IWU

Afin de mettre en évidence la complexité de la chaîne de processus de FA, les étapes de post-traitement les plus importantes sont listées et brièvement décrites ci-dessous :

- **Extraction de la chambre de construction et retrait du matériau non solidifié (poudre, liquide)**

- **Nettoyage des pièces pour éliminer les résidus (grenailage, sablage, nettoyage neige CO₂, projection de glace carbonique, lavage, etc.)**

- **Enlèvement d'une partie de la plaque de construction, enlèvement des structures de support**

- **Traitement thermique de détensionnement (pour de nombreux métaux pour le relâchement du stress et les propriétés mécaniques souhaitées)**

- **Traitement de surface, si nécessaire (passivation, peinture, anodisation, etc.)**

- **Finir l'usinage, si nécessaire, pour assurer localement une précision dimensionnelle élevée et une surface lisse avec une faible rugosité, manuellement ou par commande numérique (perçage, fraisage, tournage, coupe fil des éléments fonctionnels, etc.)**

- **Assemblage de pièces dans des assemblage ou des produits complets**

7 Assurer la sécurité en particulier pour les poudres métalliques et les gaz industriels

En termes de sécurité, la poudre de métal représente le plus grand risque. D'une part, la poudre métallique peut créer des atmosphères explosives, d'autre part, elle peut être dangereuse pour la santé des employés. En particulier, de petites (nano) particules de poudres métalliques sont soupçonnées de provoquer une fibrose pulmonaire lorsqu'elles sont inhalées - de la même manière que l'amiante. En outre, des substances comme l'Inconel 718 et Hastel-

loy X sont même soupçonnées d'être cancérogènes. Il est donc essentiel de gérer ces risques. Vous devez former vos employés à la manipulation des matières dangereuses et fournir l'équipement de sécurité personnel nécessaire. Les fabricants de machines et d'équipements devraient être en mesure de fournir des conseils sur la manière d'assurer une manipulation sûre de la poudre ainsi que de l'ensemble du processus.

Recycler et stocker la poudre dans une atmosphère de gaz inerte

Afin de gérer les risques de sécurité, toujours stocker votre poudre dans des conditions sèches et sous gaz inerte. Utilisez des récipients à poudre spécifiques fournis par le fabricant de la machine - ils sont 100% compatibles avec votre machine et assureront une manipulation correcte de la poudre. Une alternative consiste à faire appel à des fabricants d'équipements spécialisés ayant fait leurs preuves.

Tamisez votre poudre sous gaz inerte juste avant de la réutiliser. Les postes de tamisage constituent une part importante des équipements périphériques requis pour la FA; par conséquent, leurs coûts et leurs temps de process doivent être pris en compte dès le début.

Un autre risque à gérer est l'anoxie. L'anoxie est une affection caractérisée par l'absence d'apport d'oxygène à un organe ou à un tissu. Il peut causer des vertiges ou même être mortel. Comme les gaz inertes utilisés dans la fabrication additive sont inodores et invisibles, une installation de sécurité anoxie est nécessaire pour vérifier l'oxygène ambiant dans l'atmosphère environnante du poste de travail.

Dans la fabrication additive, ce risque doit être géré avec soin :

- a) la production se fait à l'intérieur, souvent dans de petites pièces et non dans de grands halls industriels à circulation d'air naturelle,
- b) le process exige que les employés ouvrent la porte de la machine pour enlever les pièces
- c) les matériaux dangereux ne peuvent pas être vus ou sentis - ce qui peut conduire à une sous-estimation du danger.

Habituellement, les installations de production doivent être équipées d'un détecteur d'oxygène associé à un dispositif d'alarme (alarme visuelle, sonore, et vanne de coupure d'alimentation en gaz inerte) en cas de fuite. Cette installation de détection d'oxygène doit être entretenue et vérifiée périodiquement conformément aux instructions du fabricant et la réglementation.

8 Sélectionner le gaz et l'approvisionnement optimal pour le procédé

L'alimentation en gaz est essentielle pour la fusion sélective laser. Interrompre le processus de fabrication en raison du manque de gaz inerte aura au final un impact à la fois sur le coût et le temps. Le processus de fusion s'arrête et la qualité de la pièce peut être altérée. Le redémarrage du processus peut avoir un impact négatif sur la qualité de la pièce et même entraîner une pièce défectueuse. Considérant que certaines pièces peuvent nécessiter un nombre élevé d'heures de fabrication, cette perte est importante.

Selon le matériau que vous traitez, différents gaz inertes peuvent être utilisés. Pour le traitement de la poudre de titane, l'argon est le gaz préconisé. Pour d'autres matériaux tels que l'acier ou l'aluminium, l'azote peut être une alternative plus économique à l'argon, ce qui pourrait toutefois influencer la microstructure du matériau. Dans certains cas, les fabricants de machines spécifient l'utilisation d'un gaz pour un ensemble de paramètres donné.⁹⁾¹⁰⁾ [Référence:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785412700297> <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-33-Starr.pdf>]

Lors du choix des options d'approvisionnement pour le gaz du procédé, certains facteurs doivent être pris en compte.

Les points suivants doivent être considérés :

- a) La pureté du gaz requise (souvent spécifiée par le fabricant de la machine)
- b) La consommation annuelle moyenne de gaz (basée sur les données de la machine et les calculs basés sur le fonctionnement envisagé)
- c) Considérations telles que la disponibilité de l'espace de stockage, l'évolution des besoins futurs, etc.

Pour une utilisation d'azote, deux possibilités d'approvisionnement sont envisageables. D'une part, l'approvisionnement en gaz s'appuyant sur un fournisseur de gaz tel qu'Air Liquide, ou d'autre part, l'utilisation d'un générateur d'azote sur site produisant de l'azote à partir d'air comprimé. Ce choix est complexe et dépend de facteurs tels que les exigences de pureté du gaz, de l'évolution du besoin futur, de l'approvisionnement en air comprimé et plus encore.

Air Liquide propose ces deux possibilités. Pour étudier la meilleure option d'approvisionnement pour votre projet, prenez contact avec votre représentant Air Liquide.

Si une alimentation conditionnée du gaz est privilégiée (meilleure option pour vous ou une nécessité, si vous avez besoin d'argon), vous avez le choix entre du gaz conditionné dans des cadres (12 ou 16 bouteilles) ou des gaz approvisionnés sous forme liquide (produits en vrac) livré dans un réservoir cryogénique.

L'approvisionnement en cadres est très flexible, car ces derniers peuvent être placés soit à proximité de votre machine (en respectant les consignes de sécurité bien sûr) ou bien raccordés à une centrale d'approvisionnement en gaz sur votre site, généralement à l'extérieur du bâtiment. Un cadre contient généralement de 90 à 180 m³ de gaz (200 bars). Habituellement, deux cadres sont raccordés à une centrale d'in-

version qui assure la détente du gaz et la commutation automatique pour assurer la continuité de la fourniture du gaz. Une fois qu'un cadre est vide, il doit être remplacé par un cadre plein. Certaines actions sont nécessaires lors de la commutation des cadres, la vérification de la quantité de gaz restante et enfin assurer les commandes des nouveaux cadres.

L'approvisionnement en gaz liquide (vrac) est généralement la méthode d'approvisionnement la plus économique si vous avez une consommation d'environ 10 000 m³/an, ou plus. L'alimentation en vrac nécessite l'installation d'un réseau de distribution et d'un réservoir avec des exigences de sécurité spécifiques. Votre représentant commercial Air Liquide vous aidera à définir un emplacement approprié sur votre site.

9 Gérer la qualité commence avec la poudre

9.1 Vérifier votre poudre entrante

Même avec les meilleures machines et les meilleurs paramètres de traitement dans des conditions idéales, vous n'obtiendrez pas de résultats satisfaisants si la qualité de la poudre métallique est mauvaise. La qualité initiale doit correspondre à vos exigences pour les propriétés mécaniques finales de la pièce. En principe, deux approches liées à la gestion de la qualité de la poudre sont possibles.

L'approche la plus simple consiste à acheter de la poudre préqualifiée pour la fabrication additive qui a fait l'objet de contrôles de qualité stricts. C'est typiquement le cas lors de l'achat de poudre auprès des fabricants de machines. Le fabricant de la machine garantit généralement que la poudre peut être traitée sur sa machine comme prévu avec le jeu de paramètres donné. Bien que cette approche fasse gagner du temps et ne nécessite pas d'équipement spécifique, elle coûte également plus cher.

Pour des volumes de consommation plus importants, acheter de la poudre directement sur le marché et faire la qualification vous-même est généralement avantageux. Comme la poudre peut être contaminée ou s'écarter des spécifications, la qualité initiale de la poudre doit être contrôlée en vérifiant sa composition chimique ainsi que ses propriétés physiques.

La composition chimique telle que les éléments de l'alliage, mais aussi les oligo-éléments ou les impuretés peuvent être déterminées en utilisant l'analyse par

fluorescence X. De plus, la forme de ces impuretés (si détectées) doit être analysée.

Les principales caractéristiques physiques des poudres sont la taille des particules (granulométrie) et la forme des particules (morphologie). Elles déterminent dans une large mesure la coulabilité de la poudre et d'autres propriétés rhéologiques. Le contrôle qualité des caractéristiques physiques devrait inclure des analyses de granulométrie, de morphologie et de coulabilité.

Actuellement, il n'y a pas de critères scientifiques clairs qui définissent et associent les caractéristiques de la poudre et leurs influences sur les propriétés des pièces finales. Cependant, vous pouvez déterminer s'il existe des écarts inhabituels entre les différents lots et vous serez en mesure de mieux évaluer la poudre qui doit être qualifiée.

9.2 Gérer et surveiller avec soin la qualité de votre poudre en cours d'utilisation

D'un point de vue économique, le recyclage de la poudre est important. Dans le même temps, il doit être en cohérence avec les exigences techniques. Pendant le processus de construction, les particules agglomérées et oxydées (projections) sont causées par l'oxygène et l'humidité et les instabilités du bain de fusion. Ces projections, formées par des gouttelettes de métal en fusion qui se solidifient en vol avant de se déposer sur le lit de poudre, peuvent modifier la granulométrie de la poudre utilisée ainsi que sa composition chimique¹¹⁾. Elles peuvent également introduire des porosités ou des inclusions dans les pièces. En fin de compte, la qualité des pièces finales peut être affectée négativement. Alors que le recyclage par tamisage vise à éliminer la plupart des «mauvaises» particules, certaines reste-

ront et s'accumuleront au fil du temps. Sur la base des exigences des pièces finales, une spécification de qualité sur la poudre recyclée devra être établie avec des contrôles stricts. Si vous pouvez utiliser de la poudre recyclée pour vos pièces, pensez à mélanger ou au moins à remplir le réservoir de poudre avec de la poudre «neuve», ce qui aidera à réduire le degré de changements chimiques et physiques de la poudre. Afin de contrôler ce processus, un système d'analyse et de suivi régulier des lots de poudre et des prélèvements devra être mis en place. Cela vous permettra de déterminer la quantité de poudre ajoutée ou extraite pour chaque conteneur.¹²⁾

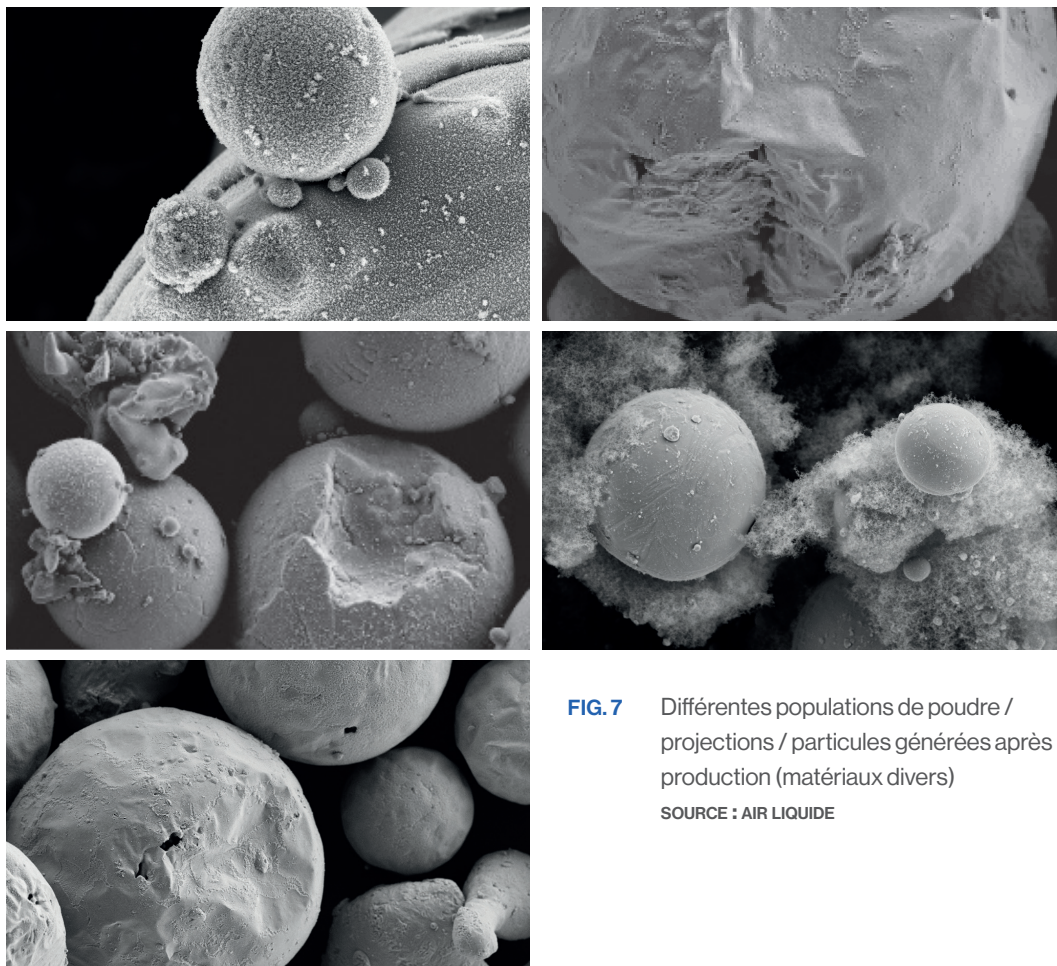


FIG. 7 Différentes populations de poudre / projections / particules générées après production (matériaux divers)
SOURCE : AIR LIQUIDE

10 Gérer votre processus de FA pour assurer la qualité des pièces

10.1 Minimiser l'exposition à l'oxygène et éviter l'humidité dans la chambre de fabrication

Les machines de fusion laser sélectives ont été conçues avec un flux de gaz inerte dans la chambre de construction pour réduire l'oxygène ainsi que la teneur en humidité et pour assurer la sécurité (VOIR AUSSI CONSEIL 4). O_2 et H_2O ont un impact immédiat sur la qualité du produit et la recyclabilité de la poudre, car ils oxydent le métal et peuvent augmenter la porosité. Les effets observés avec une concentration accrue en oxygène peuvent être la délamination des couches, la formation d'inclusions de forme irrégulière

et une rugosité accrue et l'oxydation des surfaces orientées vers le bas.

L'effet de l'humidité pendant le processus de fabrication est lié aux éléments de la molécule d'eau - l'oxygène et l'hydrogène. Contrairement à l'oxygène en tant que composant gazeux dans l'atmosphère de fabrication, la forte concentration en oxygène de l'humidité affecte la stabilité du bain de fusion et peut provoquer la formation de porosités et de projections ainsi que de

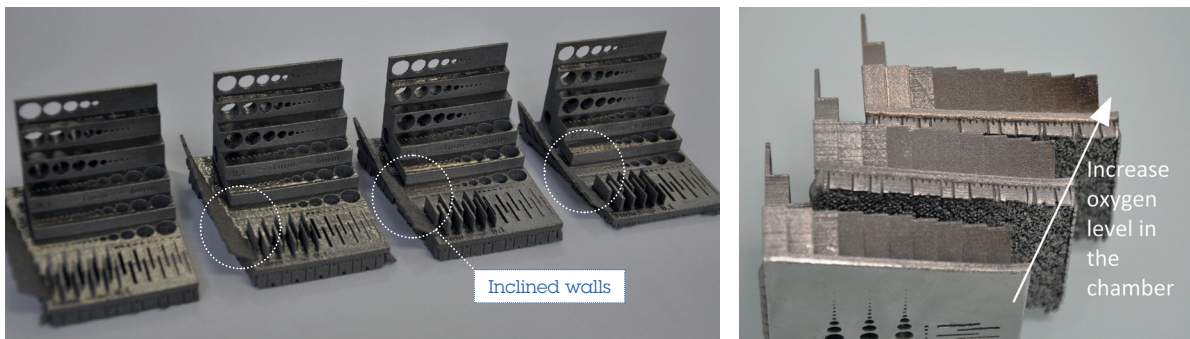


FIG. 8 Échantillons visuels fabriqués sous différents niveaux d'oxygène, et observation des plans inclinés.

SOURCE: AIR LIQUIDE

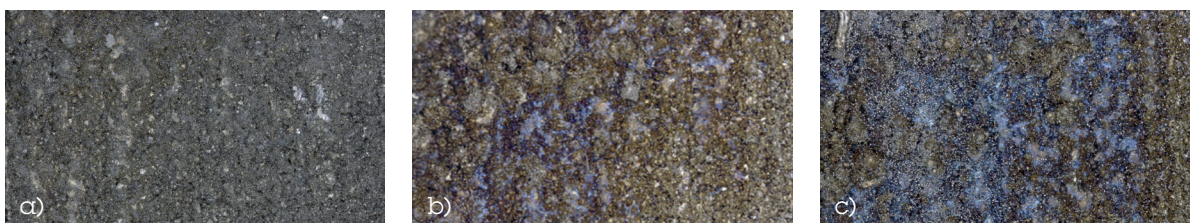


FIG. 9 Images par microscopie optique de la surface tournée vers le bas de la paroi inclinée fabriquée en (a) un faible niveau d'oxygène dans la chambre, (b) un niveau d'oxygène moyen et (c) un niveau d'oxygène élevé.

SOURCE : AIR LIQUIDE

l'oxydation. La présence d'hydrogène peut conduire à des bains de fusion sursaturés, en particulier en alliage d'aluminium. Ceci entraîne la nucléation et la croissance des porosités d'hydrogène. La porosité à l'hydrogène entraîne finalement des propriétés mécaniques inférieures.¹³⁾

Il est également évident que des fuites dans le système de la machine entraîneront des

niveaux d'oxygène plus élevés. Ainsi, un contrôle régulier est recommandé et le suivi de la consommation de gaz permet d'identifier les écarts inhabituels pouvant être provoqués par des fuites.

Une façon de diminuer les niveaux d'oxygène et d'humidité à l'intérieur de la chambre est d'augmenter le débit de gaz, comme le montre la FIGURE 10.

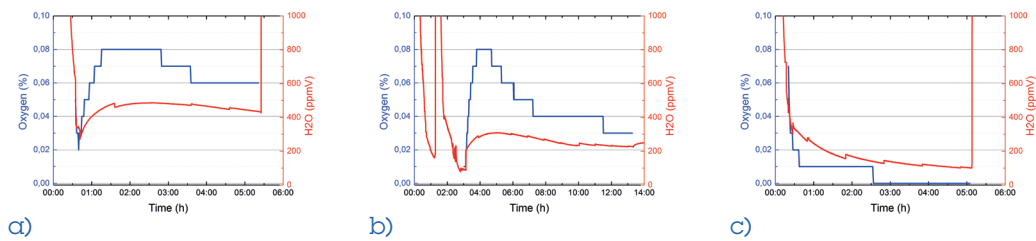


FIG 10 Taux d'oxygène et d'humidité en fonction du temps, pour la production réalisée sous (a) débit de gaz faible, (b) débit de gaz moyen et (c) débit de gaz élevé SOURCE : AIR LIQUIDE

Afin de minimiser les effets néfastes de l'oxygène, il est très important de:

- a) Contrôler le niveau d'oxygène dans la chambre afin qu'il reste en dessous du seuil pour répondre aux exigences de qualité (souvent les fabricants spécifient 1000 ppm).
- b) Assurer une pureté de gaz suffisante au point d'utilisation en spécifiant la pureté du gaz inerte acheté / généré et en éliminant les sources de contamination sur le chemin de la machine (par exemple en privilégiant des réseaux métalliques au lieu de tuyaux flexibles)
- c) Vérifiez régulièrement l'étanchéité des machines de FA

Les sources d'humidité comprennent (i) la poudre de métal elle-même, (ii) l'atmosphère ambiante car les machines ne sont pas parfaitement étanches ainsi que (iii) les pièces de la machine.

Afin de réduire le niveau d'humidité, vous devriez

- a) Sécher l'équipement avant de l'utiliser dans le processus de fabrication.
- b) Éviter l'entrée d'humidité même pendant les temps d'arrêt de la machine (par exemple en rinçant la chambre de fabrication avec un gaz inerte, et sec).
- c) Assurez-vous également que votre poudre est sèche (VOIR CONSEIL 7)..

Si les pièces à fabriquer imposent un contrôle de qualité rigoureux et que les matériaux sont très sensibles (par exemple Ti6Al4V), envisagez d'installer un système de climatisation pour contrôler l'humidité - en particulier dans les régions à forte humidité (tropiques, subtropicales).

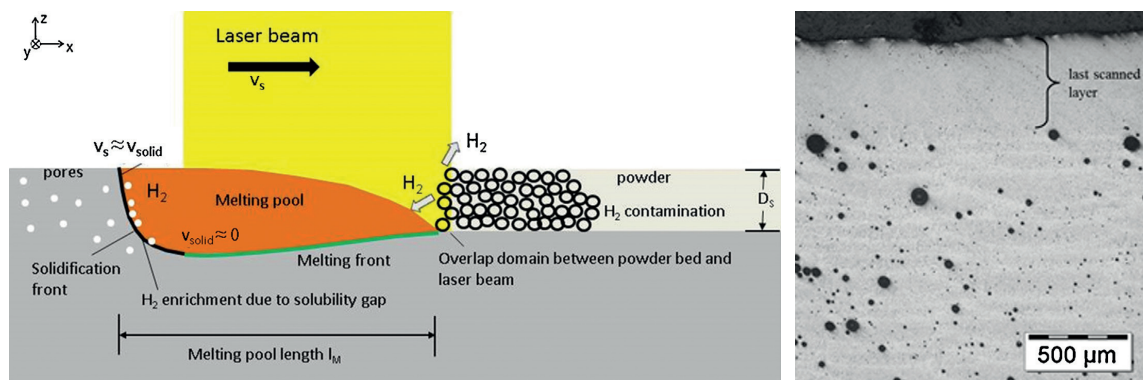


FIG. 11 (a) Aperçu schématique de la zone d'interaction entre le rayonnement laser et la poudre et (b) coupe transversale d'un échantillon AlSi10Mg SLM [POPRAWA ET AL. (2015)¹³⁾

10.2 Incorporer des échantillons d'essai pertinents dans vos travaux de fabrication

Comme nous l'avons montré dans les conseils précédents, de nombreux facteurs peuvent modifier la reproductibilité de votre production, notamment l'approvisionnement en poudre, l'alimentation en gaz, la qualité de la machine, les conditions de stockage de la poudre et bien d'autres. Il est donc important de vérifier et d'assurer la reproductibilité.

Pour chaque lot de production - ou au moins régulièrement - nous recommandons d'inclure des échantillons de test dans vos travaux de construction, tels que des barres de traction, des éprouvettes de test et des spécimens d'autres formes et tailles pour vérifier régulièrement la qualité des propriétés des pièces fabriquées: propriétés mécaniques, rugosité de surface et dureté

(VOIR FIGURE 12). Pour vérifier la reproductibilité et la qualité de fabrication, il est recommandé de placer des éprouvettes de test lors de chaque lot de construction. Une vérification relativement simple, rapide et rentable consiste à construire un cube de test dans chaque lot de construction et à inspecter sa densité (microstructure, niveau de porosité) et ses dimensions. Cela peut souvent être complété par des éprouvettes de traction, soit comme échantillons témoins, soit pour des essais de traction immédiats. La directive VDI 3405 partie 2 décrit et recommande des procédures d'essai spécifiques ainsi que les types et tailles d'échantillons. Il est recommandé de suivre les directives fournies dans VDI 3405-2¹⁴⁾ à ce sujet.

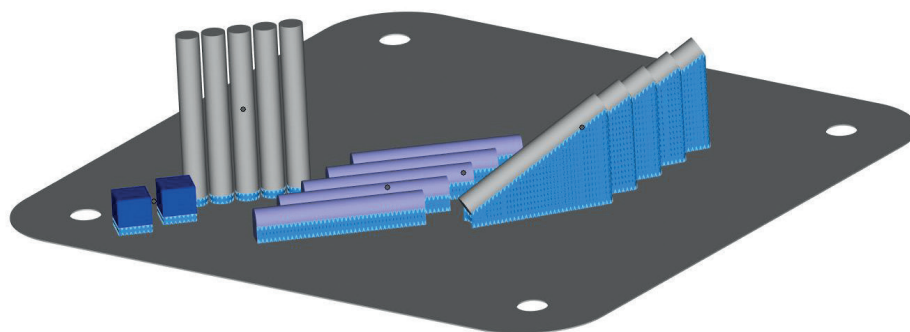


FIG. 12 Exemple de conception d'une plate-forme de construction avec différents types, positionnement et orientation de l'éprouvette SOURCE : AIR LIQUIDE

Demandez aux experts

Air Liquide

Air Liquide est le leader mondial des gaz, technologies et services pour l'industrie et la santé. Il est présent dans 80 pays avec environ 67 000 employés et sert plus de 3 millions de clients et de patients. L'azote, l'argon et l'oxygène sont des petites molécules essentielles pour la vie, la matière et l'énergie. Ils incarnent le territoire scientifique d'Air Liquide et sont au cœur des activités de l'entreprise depuis sa création en 1902.

Air Liquide a pour objectif de fournir aux clients des solutions et des technologies gaz innovantes, en améliorant leur performance et en les aidant à réduire leur impact environnemental. Grâce à notre expertise, nous permettons à nos clients de se concentrer sur leurs activités principales, et nous fournissons des solutions qui augmentent leur compétitivité.

En matière de fabrication additive, Air Liquide a développé une forte expertise. Deux équipes de R & D basées à Paris-Saclay (France) et à Chicago (États-Unis) traitent respectivement de sujets liés au gaz pour la fabrication additive de métaux et de polymères. Ils étudient le rôle des gaz dans la fabrication additive afin d'aider les clients à optimiser leur production industrielle et conseillent les fabricants de machines sur la manière d'améliorer encore l'utilisation

des gaz dans le processus. Dans le cadre de cette démarche d'innovation ouverte, ces activités de recherche comprennent des partenariats avec plusieurs institutions académiques et entreprises industrielles.

En outre, Air Liquide utilise le procédé AM pour fabriquer des pièces pour ses propres besoins - par exemple pour développer une nouvelle technologie de réacteur-échangeur permettant une production plus économique d'hydrogène. Cela renforce le savoir-faire d'Air Liquide dans la conception, la production et l'utilisation de la technologie.

Chaque jour, les clients de la filière couvrant la production de poudre, les process de construction et les post-traitements font confiance à Air Liquide pour la fourniture de gaz mais aussi de services et d'expertise. Air Liquide les aide en permanence à sélectionner l'installation optimale d'alimentation en gaz adapté à leurs besoins et à mettre en œuvre des solutions personnalisées pour l'optimisation des process. Par exemple, en concevant l'alimentation en gaz pour la production de poudre, en conseillant sur les traitements thermiques ou en fournissant des équipements spécifiques

Institut Fraunhofer

Le Fraunhofer IWU à Chemnitz et Dresde est l'un des instituts de recherche les plus renommés pour la technologie de production industrielle en Allemagne. Il fait partie de la Fraunhofer-Gesellschaft eV (FhG), qui relie la recherche scientifique et les applications industrielles. Aujourd'hui, il est la principale organisation des instituts de recherche appliquée et de développement en Europe. Le développement de dispositifs de production intelligents et l'optimisation de ses processus de fabrication connexes sont les principaux axes de recherche de Fraunhofer IWU. Fraunhofer IWU est l'un des principaux instituts pour la production économique en ressources de la Fraunhofer-Gesellschaft. Avec plus de 600 collaborateurs, il est un partenaire important en R & D pour les industries automobile / transport, machines-outils et mécanique. La recherche au Fraunhofer IWU est regroupée dans trois domaines scientifiques: la mécatronique et les structures légères (y compris la fabrication additive), les technologies de formage et d'assemblage et les machines-outils, les systèmes de production et l'usinage. Fraunhofer IWU a acquis une réputation internationale pour le développement de processus efficaces de chaîne de valeur et de chaîne d'approvisionnement, en particulier dans les secteurs de la machine-outil, de la fabrication de véhicules et de composants. De nouvelles recherches récentes com-

prennent des méthodes pour combiner des technologies de fabrication et de nouveaux matériaux fonctionnels. L'institut est membre de l'EFFRA, de l'European Factories of the Future Research Association et de l'EARPA, l'European Automotive Research Partners Association. Fraunhofer IWU joue également un rôle actif dans la stratégie de spécialisation intelligente de Saxe via l'initiative Vanguard. La fabrication additive (FA) est un domaine de recherche bien établi chez Fraunhofer IWU depuis près d'une décennie, et se concentre sur le lit de poudre, la FA métal à base de laser et ses applications. Des chercheurs de l'IWU soutiennent les partenaires industriels de l'institut pour faire de la FA une voie de fabrication viable à travers des projets de recherche en termes de nouvelles applications de FA, principalement dans le secteur de l'outillage, de l'automobile et du médical. en termes de nouveaux matériaux, de gestion de la qualité, de simulation de processus et d'intégration fonctionnelle.

Bibliographie

1) Fig. 1

<https://www.3dprintingbusiness.directory/news/project-t-o-s-t-wins-3d-pioneers-challenge-metal-3d-printed-skateboard-trucks/>

2) Fig. 2

Mathias Gebauer, Bernhard Müller, Adriaan Spierings, Stefan Polster, Philipp Stoll, Tobias Feld, Marcel Klinger, Andreas Zurbrügg: **High performance sheet metal forming tooling by additive manufacturing**. In: Drstvensek, Igor (Ed.): Rapid Prototyping and Innovative Manufacturing Network - RAPIMAN-: 6th International Conference on Additive Technologies iCAT 2016. Proceedings: 29. - 30. November 2016, Nürnberg, Ljubljana: Interesansa, 2016, S. 354 - 361

3) Conseil n° 3

Product Sheet Concept Laser X-Line 2000 R (retrieved July 21, 2017).

http://www.concept-laser.de/fileadmin/Neue_Produnkte/1610_X_LINE_2000R_DE.pdf

4) Conseil n° 3

Product Information EOS M 400 (retrieved July 21, 2017).

https://www.eos.info/systeme_loesungen/metall/systeme_und_zubehoer/eos_m_400

5) Fig. 3 et 4

Langer, Bernhard, Christoph Schäff, Hendrik Veenker, and Christoph Balzer:

Additive Manufacturing – next generation AMnx (April 12, 2016).

https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_additive_manufacturing_next_generation_amnx_study_20160412.pdf

6) Conseil n° 4

Listes des organisations spécialisées

7) Fig. 5

R. Neugebauer, B. Müller, T. Toepfel: **Innovative implant with inner functional channels and cavities**. European Cells and Materials, Vol. 22, Suppl. 1, 2011, S. 11, ISSN 1473-2262

8) Conseil n° 6

R. Neugebauer, B. Müller, M. Gebauer, T. Toepfel: **Additive manufacturing boosts efficiency**

of heat transfer components. Assembly Automation, Vol. 31, Issue 4, 2011, S. 344 - 347, ISSN 0144-5154, DOI

<http://dx.doi.org/10.1108/0144515111172925>

9) **Conseil n° 8**

Lawrence E. Murr, Edwin Martinez, Jennifer Hernandez, Shane Collins, Krista N. Amato, Sara M. Gaytan, Patrick W. Shindo: **Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting.** In: Journal of Materials Research and Technology, Volume 1, Issue 3, 2012, Pages 167-177, ISSN 2238-7854.

[https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70029-7](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70029-7)

10) **Conseil n° 8**

Thomas L. Starr, Khalid Rafi, Brent Stucker, Christopher M. Scherzer: **Controlling phase composition in selective laser melted stainless steels.** 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2012. 439-446.

11) **Conseil n° 9.2**

Marco Simonelli, Chris Tuck, Nesma T. Aboulkhair, Ian Maskery, Ian Ashcroft, Ricky D. Wildman, Richard Hague: **A Study on the Laser Spatter and the Oxidation Reactions During Selective Laser Melting of 316L Stainless Steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V, Metallurgical and Materials Transactions A.** 46.

<http://dx.doi.org/10.1007/s11661-015-2882-8>

12) **Conseil n° 9.2**

Lucy Grainger: **How much can you recycle metal additive manufacturing powder?** (June 24, 2016).

<http://www.renishaw.com/en/blog-post-how-much-can-you-recycle-metal-additive-manufacturing-powder--38882>

13) **Conseil n° 10.1**

Christian Weingarten, Damien Buchbinder, Norbert Pirch, Wilhelm Meiners, Konrad Wissenbach, Reinhart Poprawe: **Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg.** In: Journal of Materials Processing Technology, Volume 221, (2015), Pages 112-120, ISSN 0924-0136.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.013>

14) **Conseil n° 10.2**

VDI Richtlinie 3405 Blatt 2 - Additive Fertigungsverfahren - Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung.

<http://www.vdi.de/3405>



Fraunhofer IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz
www.iwu.fraunhofer.de



Air Liquide France industrie
152, avenue Aristide Briand
92220 Bagneux
www.airliquide.fr