

- amixon® whitepaper -

La métallurgie des poudres et la rentabilité  
de la fabrication additive

# **Pour une impression 3D durable : des technologies de traitement innovantes pour les poudres métalliques**



## INTRODUCTION

# Vers une impression 3D économique

Les procédés de fabrication additive se trouvent à un tournant. La technologie est sur toutes les lèvres et elle fonctionne. Et pourtant, une grande partie de l'industrie continue de considérer l'impression 3D comme une technologie d'avenir et non comme un modèle de production actuel déjà réaliste et rentable.

Les avantages de l'impression 3D sont indéniables : Une plus grande liberté de conception, des possibilités étendues de "production à la demande" et de prototypage, des adaptations de dimensions et moins de gaspillage de matériaux. Les entreprises du secteur de la production s'accordent à dire que ce sont de bonnes conditions pour un marché volatile. La technologie 3D a le potentiel de changer radicalement la nature de la production.

Cependant, malgré cet optimisme, une augmentation relativement constante de l'acceptation ainsi que des progrès technologiques continus, l'impression 3D n'a pas encore réalisé une percée majeure. Les procédés de fabrication conventionnels, tels que le moulage par injection et les techniques d'usinage, dominent toujours la production. Il n'y a pas de signes indiquant que l'impression 3D pourrait sérieusement remettre en question leur position.

La raison de la lenteur de la courbe de développement de l'impression 3D est vite trouvée : Les coûts de fabrication sont trop élevés. Des décennies de recherche et de savoir-faire ont permis d'optimiser les processus de fonte, de moulage et d'enlèvement de copeaux à cet égard. En revanche, la fabrication additive manque de concepts et de mesures de contrôle des coûts.

Ce livre blanc aborde ensuite les obstacles qui entravent la rentabilité de l'impression 3D. Ce n'est qu'en apportant des réponses adéquates à ces obstacles que l'on pourra faire progresser durablement l'impression 3D et, en fin de compte, assurer son succès dans l'industrie du futur.





À PROPOS D'AMIXON

# Technique de mélange industriel made in Germany

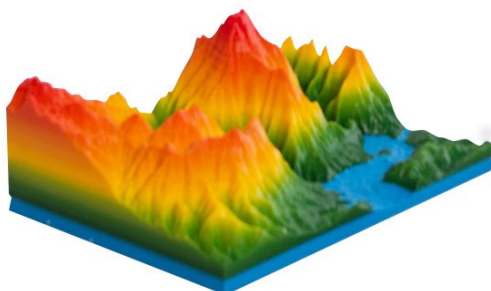
Depuis près de 40 ans, amixon® est leader du marché dans le développement et la fabrication d'installations de mélange de haute précision répondant aux exigences d'hygiène particulièrement élevées de l'industrie de préparation. Les mélangeurs industriels amixon® sont fabriqués en Allemagne, en acier inoxydable, répondent aux normes d'hygiène les plus strictes et sont équipés d'une technologie de mélange innovante. Chaque appareil est une solution sur mesure pour vos exigences individuelles en matière de mélange de poudres métalliques, céramiques et polymères utilisées dans la fabrication additive.





# Contenu

1. Les facteurs de coûts dans la fabrication additive	6
1.1. L'équipement	6
1.2. Force de travail	7
1.3. Matériau	8
2. Le défi de la rentabilité dans la production de poudre	9
2.1. Exigences en matière de distribution granulométrique et de morphologie	9
2.2. Propriétés rhéologiques	10
2.3. Réutiliser les excédents de poudre métallique	11
3. L'importance de la technique de mélange pour une fusion rentable du lit de poudre	12
3.1. La vidange intégrale réduit les pertes de produit et augmente la Traçabilité de l'enrobé	12
3.2. Homogénéité et conditionnement	13
3.3. Solutions pour le retraitement et le succès Réutilisation des poudres métalliques	15
4. Conclusion	16



amixon® Sécheur-mélangeur à cône et réacteur à cône  
AMT

## RÉSUMÉ

# La poudre de métal et la rentabilité de l'impression 3D

La fusion laser sur lit de poudre (en anglais Laser powder bed fusion ou L-PBF) est un procédé de fabrication additive qui appartient au groupe des procédés de fusion par faisceau. Plusieurs couches de poudre métallique sont fusionnées par fusion laser sélective afin de former une réplique exacte de modèles numériques en 3D. Le potentiel du L-PBF est indéniable. En tant que technologie "Industrie 4.0", ce procédé de fabrication additive est considéré comme porteur d'avenir, car il permet de produire des pièces à la demande et des produits de masse spécifiques aux clients. Pourtant, malgré ses nombreux avantages et près d'une décennie d'engouement, l'impression 3D reste une technologie de niche. La raison : le processus est trop lent et le coût des matériaux est trop élevé. Cela rend difficile l'utilisation de l'impression 3D dans un large environnement industriel.

Le présent livre blanc d'amixon® est consacré à ces obstacles. Il explique les raisons et discute des possibilités d'une impression 3D durable et économique par fusion sur lit de poudre. Le plus grand défi ? Ce sont certainement les investissements élevés pour l'imprimante 3D elle-même. Mais les coûts des matériaux sont tout aussi importants pour pouvoir évaluer en profondeur la rentabilité du procédé d'impression 3D. Les coûts des matériaux sont également un casse-tête pour les producteurs de bobines métalliques nécessaires à la L-PBF, car l'efficacité des coûts joue également un rôle pour eux. La technique de mélange innovante d'amixon® peut les aider. Celle-ci contribue à réduire les coûts des matériaux afin que ce procédé de fabrication additive devienne économiquement rentable pour un plus grand nombre d'industries.



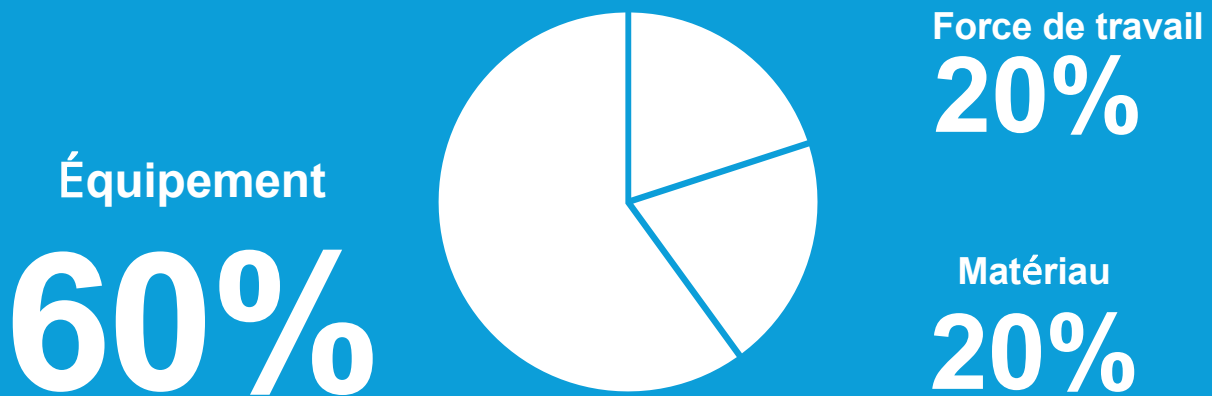


# 1

## Les facteurs de coûts dans la fabrication additive

Les imprimantes 3D elles-mêmes, le personnel formé à cet effet et le matériel nécessaire au bon déroulement du processus sont coûteux.

### Les facteurs de coûts en de la fabrication additive en un coup d'œil :



Source : (Bono s.d.)

#### 1.1 L'équipement

L'équipement représente le facteur de coût le plus important, estimé à 60 %.<sup>1</sup> L'achat d'une imprimante 3D à la fois grande et précise coûte déjà près d'un million d'euros. Il faut également prévoir 10 % du prix d'achat pour les frais de maintenance et 12 % pour les pièces de rechange.<sup>2</sup>

En outre, les processus d'impression 3D à grande échelle nécessitent une infrastructure stable pour le transport et la conception des matériaux. Il peut également y avoir des coûts supplémentaires pour le refroidissement, le traitement et la finition des composants imprimés, et le fonctionnement d'une imprimante 3D consomme beaucoup plus d'énergie que les méthodes de fabrication <sup>traditionnelles</sup><sup>3</sup>.

Certes, les coûts totaux devraient baisser à long terme avec les progrès constants de la technologie. Mais les obstacles financiers restent élevés, en particulier pour les petites entreprises, et l'impression 3D reste une technologie peu rentable.

## 1.2 Force de travail

Environ 20% des coûts sont consacrés à la formation du personnel.<sup>4</sup> Ces coûts sont certes très similaires à ceux des méthodes de fabrication traditionnelles. Cependant, l'impression 3D est relativement lente et nécessite un personnel formé pour garantir la qualité de la conception, de l'exécution, des finitions et des contrôles de qualité fiables des composants 3D.

Ainsi, pour une "conception pour la fabrication additive" (DAFM) efficace, la seule connaissance de la CAO 3D ne suffit pas. La DAFM requiert un savoir-faire spécifique pour comprendre comment les structures imprimées en 3D peuvent s'auto-porter. Les collaborateurs formés à la DAFM peuvent en fin de compte créer des rendus 3D qui sont autoportants. Il n'est plus nécessaire d'imprimer des matériaux de support supplémentaires, ni de supporter les coûts supplémentaires de temps, de traitement et de matériaux qui y sont liés.



Comme l'impression 3D est un processus automatisé, une réduction des coûts de main-d'œuvre se développera avec le temps. En effet, les technologies numériques et robotisées sont de plus en plus utilisées dans l'ensemble de l'industrie. Les progrès technologiques accélèrent encore le processus et le personnel acquiert les compétences nécessaires pour réaliser l'impression 3D de manière efficace et rentable.

### 1.3 Matériau

Les investissements en matériaux ne représentent "que" 20% des coûts totaux.<sup>5</sup> Cependant, le contrôle des coûts et l'optimisation des processus visent à réaliser des économies dans ce segment plutôt que dans celui du personnel et de l'équipement. La raison en est que les coûts des matériaux peuvent être calculés à l'avance. Par exemple, il est facile de déterminer le volume de poudre de métal nécessaire.

En revanche, les investissements nécessaires pour le fonctionnement des appareils, les coûts de maintenance, la consommation d'énergie et l'assurance qualité ne peuvent pas être calculés avec précision. De plus, en cas de collaboration récurrente entre le client final et le producteur de poudres métalliques, ce dernier peut être mis sous pression lors de la négociation des coûts. Une stratégie qui n'est pas si simple à mettre en œuvre lorsqu'il s'agit de calculer les coûts de l'équipement et de la main-d'œuvre.

Cette focalisation sur les coûts des matériaux place les fabricants de poudres métalliques dans une position difficile : ils doivent eux aussi relever le défi d'une production rentable. Les conditions ne sont donc pas favorables à un marché de l'impression 3D autorégulé et axé sur le progrès. Le chapitre 2 de ce livre blanc est consacré aux défis qui rendent la production de poudres métalliques si coûteuse.

**Le contrôle des coûts et l'optimisation des processus se concentrent davantage sur les coûts des matériaux et moins sur les économies de personnel et de l'équipement. En effet, les coûts de matériel peuvent être comparés à l'avance et calculer facilement.**



# 2

## Le défi de la rentabilité dans la production de poudre

Des céramiques aux polymères : Il existe de nombreux matériaux à partir desquels on fabrique des poudres métalliques pour la fusion de poudres. Il existe également différentes techniques d'atomisation des matières premières pour produire des poudres métalliques. Nous nous concentrerons sur les techniques utilisant l'atomisation gazeuse. C'est l'une des techniques les plus courantes pour produire des poudres métalliques destinées à la fabrication additive.

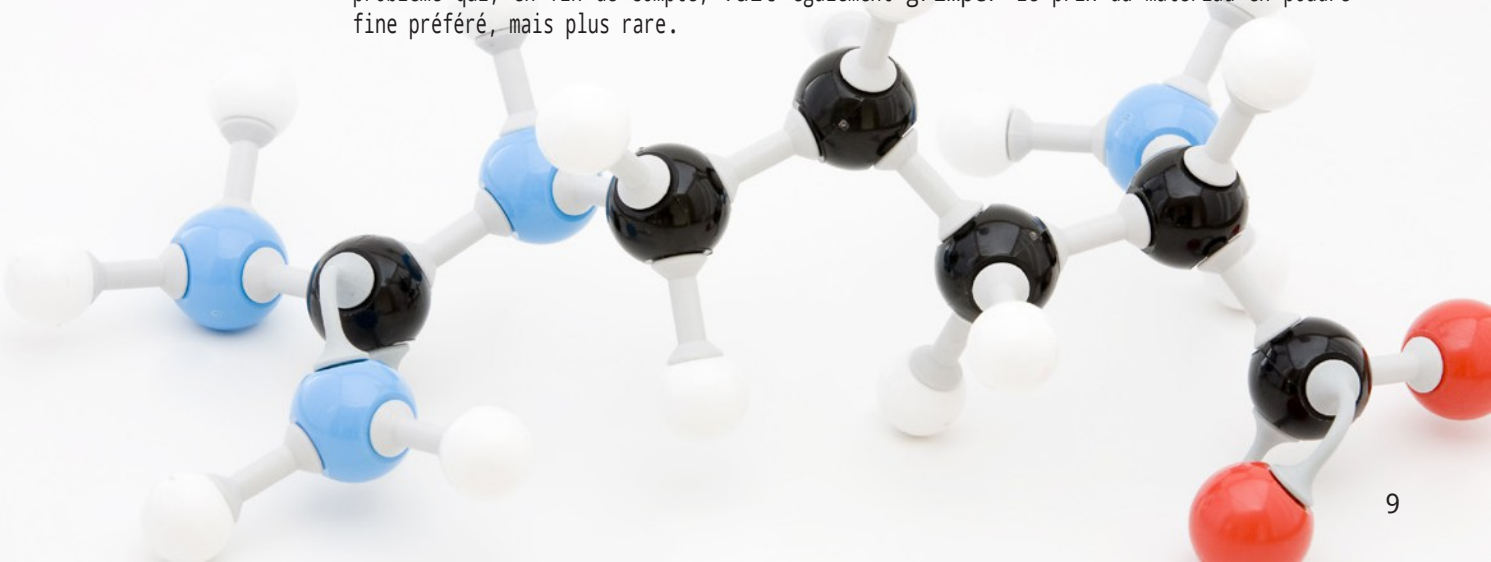
Contrairement à l'impression 3D, la métallurgie des poudres s'appuie sur des décennies de savoir-faire et d'optimisation des processus. Mais avec l'intérêt croissant pour les avantages de l'impression 3D, la demande en poudres métalliques de haute qualité a également évolué de manière positive. Au cours de la dernière décennie, la demande a augmenté de 10 à 40 % par an.<sup>6</sup> Pour répondre à cette demande croissante, les métallurgistes de poudres sont confrontés à des défis importants en termes de rentabilité des installations de production.

### 2.1 Exigences en matière de distribution de la taille des particules et de morphologie

Le processus d'atomisation gazeuse produit des particules de formes et de tailles différentes, allant de moins de 1  $\mu\text{m}$  à 500  $\mu\text{m}$ . Les taux varient selon les fabricants, mais la plupart du temps, l'atomisation gazeuse produit des particules de poudre plus grandes et plus grossières et moins de matériau fin. La poudre métallique est tamisée en lots de taille et de forme similaires avant d'être préparée et finalement emballée.

Pour pouvoir imprimer des composants stables avec de bonnes propriétés de support, la fusion sur lit de poudre nécessite une poudre métallique aussi sphérique que possible et une taille de particules uniforme. En outre, la plupart des procédés de lit de poudre nécessitent une poudre métallique extrêmement fine pour pouvoir imprimer efficacement. Les particules d'une taille d'environ 10  $\mu\text{m}$  sont le choix préféré. Les particules de taille supérieure sont plus ou moins inutilisables pour la fusion sur lit de poudre et sont difficiles à réutiliser.

Ce qui reste, c'est beaucoup de matériau excédentaire qui n'est pas utilisé. Un problème qui, en fin de compte, fait également grimper le prix du matériau en poudre fine préféré, mais plus rare.



## 2.2 Propriétés rhéologiques

La poudre métallique utilisée dans les fusions sur lit de poudre est essentielle pour l'efficacité de traitement et la qualité d'un composant 3D imprimé. Pour les applications les plus importantes, les poudres métalliques doivent répondre à certaines normes concernant leurs propriétés physiques et chimiques. Les fabricants doivent toujours s'assurer que la poudre répond de manière fiable aux exigences suivantes :

### Fluidité & tartinabilité

Lorsque les contours d'un composant 3D ont été entièrement fusionnés par le laser, le bac descend et une nouvelle couche de poudre est appliquée de manière fine et uniforme. De très bonnes propriétés d'écoulement aident à un dosage rapide et précis. Une capacité de dispersion optimale garantit que seule une faible force est nécessaire pour répartir uniformément la poudre métallique. Cela permet d'éviter d'endommager la structure du composant qui a déjà été soudé.

### Exempt d'agglomérats et de cohésion

Que ce soit pendant le stockage, le transport ou les processus de mélange : Les poudres métalliques fines risquent toujours de s'agglomérer. Pour éviter la formation de tels agglomérats, il est nécessaire de préparer et de manipuler le produit en vrac dans les règles de l'art. Cela permet d'éviter les défauts de qualité des composants 3D finis.

### Chimiquement stable

Pendant la fusion sur lit de poudre, les poudres métalliques sont fusionnées entre elles sous l'effet de la chaleur. On utilise généralement à cet effet des rayons laser ou des faisceaux d'électrons. Avant la fusion, la poudre métallique doit toutefois être chimiquement inerte. L'humidité, l'oxydation ainsi que la chaleur ou le frottement au cours d'un processus de mélange entraînent potentiellement la suppression de cet état inerte. Une situation qu'il convient d'éviter grâce à une technique de mélange innovante afin d'éviter une fusion prématurée ou insuffisante dans le processus d'impression 3D.

### Mélanges homogènes des additifs

Après l'atomisation, de nombreuses poudres métalliques sont à nouveau traitées afin d'améliorer leurs propriétés rhéologiques. Par exemple, en ajoutant des revêtements ou des additifs fluides. L'obtention de qualités de mélange homogènes idéales avec des ingrédients aussi sensibles constitue un défi majeur dans le processus de mélange.

### 2.3 Réutiliser l'excédent de poudre métallique

Une situation gagnant-gagnant pour le client final d'une part, qui souhaite maintenir les coûts des matériaux à un niveau bas, et pour les fabricants de poudres métalliques d'autre part, qui souffrent toujours d'un manque de matériaux fins : Le recyclage des poudres métalliques excédentaires présente des avantages pour les deux parties. Malheureusement, ce processus de recyclage n'est pas si simple. En effet, il est important que la qualité de la poudre de métal soit toujours élevée afin de pouvoir répondre aux exigences de performance élevées des composants 3D.

Le problème : des signes de dégradation ont été observés sur différentes poudres métalliques. Les alliages de poudre à haute température, comme Inconel 718, peuvent se déformer en fonction de leur proximité avec la fusion laser. Une partie de la poudre métallique est donc inutilisable pour une réutilisation, car elle présente des morphologies trop grandes ou trop grossières.<sup>7</sup> D'autres matériaux, comme la poudre de titane, sont sensibles à l'absorption d'oxygène et ne peuvent donc être réutilisés que quelques fois.<sup>8</sup>

Jusqu'à présent, il n'existe pas encore de méthodes qualifiées d'analyse des matériaux et de retraitement de tels résidus pour une utilisation dans la fusion sur lit de poudre. Le développement de telles méthodes serait une aubaine tant pour les fabricants de poudres que pour les utilisateurs finaux. Il existe également une marge de progression pour les approches innovantes qui offrent une base chimique pour la haute recyclabilité des nouvelles poudres métalliques. En poursuivant la recherche et le développement dans ce domaine, les fabricants de poudres pourraient apporter une contribution importante à la rentabilité de l'impression 3D.

Voyons maintenant comment les mélangeurs innovants d'<sup>amixon®</sup> peuvent aider à relever certains des défis décrits ci-dessus. L'accent est mis sur la distribution granulométrique, la rhéologie et la réutilisation des poudres métalliques.

**Il manque des approches innovantes qui fournissent une base chimique pour une réutilisation élevée de la poudre métallique neuve.**

**En poursuivant la recherche et le développement dans ce domaine, les fabricants de poudres pourraient apporter une contribution importante à la**



# 3

## L'importance de la technique de mélange pour une fusion rentable du lit de poudre

Les installations de mélange, de séchage sous vide et les réacteurs jouent un rôle crucial dans la production et le recyclage des poudres métalliques. En effet, après l'atomisation et le tamisage de la poudre métallique, des lots de particules de taille similaire sont préparés dans des installations de mélange. C'est là qu'elles acquièrent les propriétés homogènes, les compositions chimiques et les caractéristiques d'écoulement nécessaires à la fabrication de composants 3D durables et performants.

Afin de réduire le temps de traitement et d'éviter la dégradation de la poudre métallique, la technique de mélange doit permettre les processus d'homogénéisation, de conditionnement, de séchage et de refroidissement dans une seule machine. Pour ce faire, amixon® a développé des mélangeurs, des réacteurs et des sècheurs sous vide 3 en 1 qui garantissent une performance et une longévité sans précédent du produit mélangé.

Les caractéristiques suivantes de la technologie de mélange amixon® aident les fabricants de poudres métalliques à améliorer l'efficacité de leurs processus et le rendement de leurs produits, tout en leur permettant de réutiliser à tout moment les matériaux excédentaires :

### 3.1 La vidange complète réduit les pertes de produit et augmente la traçabilité de l'enrobé

Une délimitation idéale des lots sans mélange transversal est très importante pour un suivi précis des lots et une assurance qualité. Les contaminations croisées entre les différents lots ont un effet négatif sur la répartition de la taille des particules. Cela entraîne à son tour de sérieux problèmes de qualité pour les composants d'impression 3D.

La solution idéale pour relever ce défi : l'amixon® AMT, un mélangeur, sécheur et réacteur conique 3 en 1. La chambre de mélange conique et les hélices convexes permettent à la poudre métallique de s'écouler sans ségrégation et sans résidus. L'arbre de mélange n'est logé que par le haut et n'entre pas en contact avec le produit. Les dépôts de résidus de matériau sont ainsi évités.

amixon® développe des installations de mélange à fond plat qui garantissent une vidange totale des résidus jusqu'à 99,997%. L'amixon® VMT est une installation de mélange, de séchage et de réacteur 3 en 1. Elle dispose d'une cuve de mélange cylindrique équipée de la technologie innovante ComDisc®. Ce mécanisme flexible est installé sous l'arbre de mélange et s'abaisse vers le fond de la cuve lors du vidage. Là, il glisse radialement sur le fond de la centrale de mélange et dirige l'enrobé vers la sortie.

Vider complètement un mélangeur industriel n'est pas seulement indispensable pour éviter les contaminations croisées et les problèmes de traçabilité des lots. En effet, cela permet en même temps d'augmenter le rendement des lots, car il



ne reste pas de précieuses particules fines dans le mélangeur.



amixon® Mélangeur-sécheur sous vide et réacteur sous vide VMT

### 3.2 Homogénéité et Conditionnement

Pour une fusion efficace du lit de poudre, la rhéologie parfaite de la poudre métallique est d'une importance capitale. La fabrication d'un produit répondant à des exigences aussi élevées nécessite une technique de mélange bien pensée.

Les caractéristiques suivantes des mélangeurs, sécheurs et réacteurs AMT et VMT facilitent la production rentable de poudres métalliques de haute qualité pour la fabrication additive :



## Homogénéisation en douceur mais en profondeur

Les mélangeurs de poudres amixon® sont équipés d'un outil de mélange vertical à bande hélicoïdale au centre de la chambre. Lors de la rotation, un flux tridimensionnel est créé. Les poudres métalliques sont alors vissées vers le haut dans la périphérie de la chambre de mélange. Arrivées en haut, elles s'écoulent vers le bas au centre de la chambre de mélange, conformément à la force de gravité. Ce flux s'effectue dans toute la chambre de mélange et garantit un fonctionnement sans espace mort. Dans ces conditions, seule une faible fréquence de rotation est nécessaire pour éviter les agglomérats et obtenir des qualités de mélange idéalement homogènes avec d'excellentes propriétés d'écoulement. Les particules de la poudre métallique ne sont ainsi soumises qu'à de faibles forces de cisaillement et sont protégées de manière fiable. En raison du fonctionnement sous vide et sous pression, la teneur en oxygène et en azote de l'enrobé est nettement réduite.



## Intégration régulière d'additifs d'écoulement

Le processus d'homogénéisation doux mais approfondi est idéal pour les tâches de mélange exigeantes. Il s'agit par exemple de l'intégration régulière d'additifs fluides extrêmement légers, comme la silice pyrogénée. Malgré la grande sensibilité au cisaillement de ces additifs et leur tendance à flotter sur le dessus du mélange, ils sont intégrés efficacement dans le flux de mélange et de manière homogène dans le produit en vrac. Des mécanismes innovants de vidange garantissent en outre que les additifs ne se séparent pas du produit en vrac après le mélange.



## Traitement en plusieurs étapes pour le revêtement de particules

Une technique courante de traitement des poudres métalliques hygroscopiques consiste à enduire les particules d'additifs nanofins afin d'empêcher la formation d'agglomérats. Équipées d'une multitude de fonctions de traitement, les installations de mélange, de séchage et de réacteur amixon® sont parfaitement équipées pour de tels processus précis en plusieurs étapes. Pour répartir uniformément les agents de revêtement dans le produit en vrac, il faut d'abord créer un niveau d'humidité uniforme au sein de la poudre. Pour ce faire, chaque particule est mouillée avec l'additif et finalement séchée sous vide. Cela garantit un revêtement uniforme de la surface de chaque particule. En même temps, le temps de traitement et l'apport de chaleur nécessaire pour obtenir le résultat souhaité sont réduits.

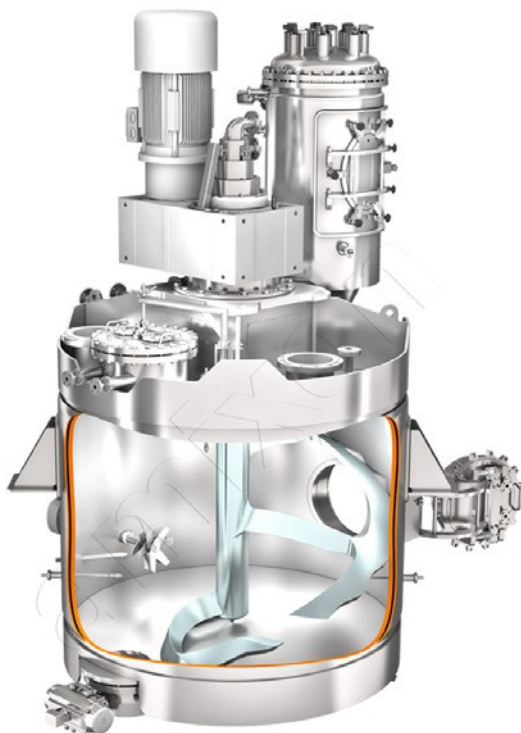
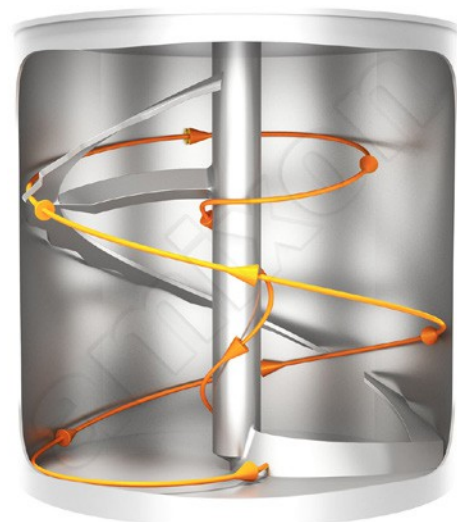


Schéma de principe VMT



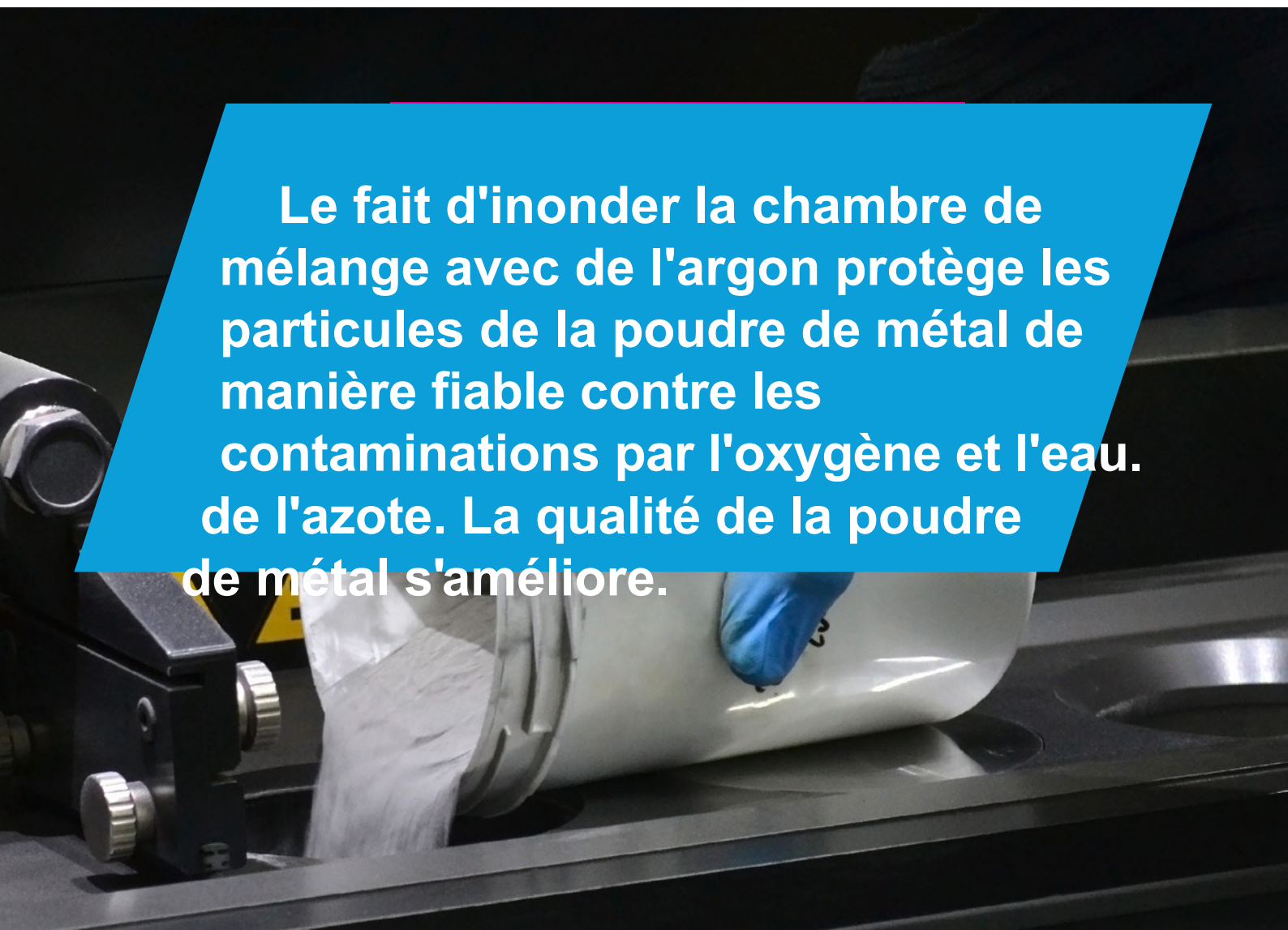
Courbe d'écoulement VMT

### 3.3 Solutions pour le recyclage et la réutilisation réussie des poudres métalliques

Le mélange de matières vierges avec des résidus en excès est l'une des techniques les plus répandues pour le recyclage des poudres métalliques. Bien que ce procédé réduise durablement la teneur en oxygène de la plupart des alliages métalliques, il ne convient pas à toutes les applications. En particulier, les applications médicales et aérospatiales sont soumises à des normes de qualité particulières que les poudres métalliques recyclées ne peuvent pas respecter.<sup>9</sup> En effet, même si la teneur totale en oxygène d'un mélange de poudre métallique neuve et recyclable semble correspondre aux spécifications, certaines particules peuvent encore avoir une teneur en oxygène trop élevée. Cela peut avoir un impact négatif sur la qualité du produit final.

Malgré ces restrictions, les mélangeurs étanches aux gaz d'amixon® se sont révélés efficaces pour réduire ces impuretés dans la poudre métallique recyclée.<sup>10</sup> Cela est possible car la chambre du mélangeur est inondée d'argon pendant le processus de mélange. Les particules de la poudre métallique sont ainsi protégées de manière fiable contre les impuretés dues à l'oxygène ou à l'azote et la qualité de la poudre métallique est améliorée.

Les mélangeurs, sécheurs et réacteurs amixon contribuent à la recherche et au développement de ces procédés économiques et respectueux des ressources. En outre, les installations de mélange soutiennent également les travaux de recherche innovants qui se consacrent à la base chimique d'un meilleur recyclage des matières premières. Cela est possible grâce à un large éventail de fonctions de traitement réglables avec précision. Les innovations dans ce domaine pourraient améliorer le rapport coût-efficacité de la fabrication additive, tant pour les fabricants de poudres que pour les utilisateurs finaux, et permettre ainsi à l'impression 3D d'être davantage prise en compte dans l'environnement industriel.



**Le fait d'inonder la chambre de mélange avec de l'argon protège les particules de la poudre de métal de manière fiable contre les contaminations par l'oxygène et l'eau, de l'azote. La qualité de la poudre de métal s'améliore.**



# 4

## Conclusion

### **Une technique de mélange innovante est nécessaire pour une fusion rentable du lit de poudre**

Qu'il s'agisse de la fabrication rapide de prototypes, d'une "production à la demande" ou de l'adaptation en masse de composants très complexes : Les procédés de fabrication additive sont considérés comme l'avenir de l'économie industrielle. Mais l'impression 3D n'est pas encore en mesure de remplacer complètement les méthodes de fabrication traditionnelles. Au contraire, il faut continuer à développer des idées innovantes pour optimiser les différents composants du système tout au long de la chaîne de production.

La recherche, la collaboration et l'innovation des processus doivent être constantes et la technologie encore jeune de la fabrication additive établira à terme de nouvelles références dans l'ensemble de l'industrie. Les mélangeurs amixon® apportent leur contribution : grâce à des solutions bien pensées, ils produisent des qualités de mélange maximales et améliorent ainsi la qualité et la rentabilité de la poudre métallique pour la fusion sur lit de poudre.





## RENSEIGNEMENT DES SOURCES

<sup>1</sup> Bono n.d.

<sup>2</sup> Thomas et Gilbert 2014

<sup>3</sup> Nyameke, et al. 2017

<sup>4</sup> Bono n.d.

<sup>5</sup> *ibid.*

<sup>6</sup> Dunkley 2019

<sup>7</sup> Samant et Lewis 2017

<sup>8</sup> *ibid.*

<sup>9</sup> Samant et Lewis 2017

<sup>10</sup> Cordova, Campos et Tinga 2019

## OEUVRES CITÉES

Bono, Eric. s.d. "Controlling Metal Powder Costs in Additive Manufacturing". Carpenter Technology. <https://www.carpentertechnology.com/en/alloy-techzone/technical-information/technical-articles/controlling-metal-powder-costs/>.

Cordova, Laura, Monica Campos, et Tiedo Tinga. 2019. "Revealing the Effects of Powder Reuse for Selective Laser Melting by Powder Characterization". JOM 1062-1072.

Dunkley, J. John. 2019. "Metal Powder Atomisation Methods for Modern Manufacturing : Advantages, limitations and new applications for high value powder manufacturing techniques." Johnson Matthey Technol. Rev., 226-232.

Nyameke, Patricia, Heidi Piili, Maija Leino, et Antti Salminen. 2017. "Preliminary Investigation on Life Cycle Inventory of Powder Bed Fusion of Stainless Steel". Conférence nordique sur le traitement des matériaux par laser. Aalborg : Physics Procedia. 108-121.

Samant, Rutuja, et Brendan Lewis. 2017. "Recyclage et reconditionnement de la poudre de métal dans la fabrication additive". IME. <https://ewi.org/metal-powder-recycling-and-reconditioning-in-additive-manufacturing/>.

Thomas, Douglas S., et Stanley W. Gilbert. 2014. "NIST Special Publication 1176." December. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/specialpublications/nist.sp.1176.pdf>.





**amixon GmbH**

55, rue Halberstaedter

33106 Paderborn Allemagne

Téléphone : +49-5251-688888-0

Télécopieur : +49-5251-688888-999

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