CARACTERISATION DES AEROSOLS EMIS PAR UN PROCÉDÉ DE FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE

Sébastien Bau*, Davy Rousset, Raphaël Payet et François-Xavier Keller

Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), 54519 Vandoeuvre les Nancy, France *Courriel de l'orateur : sebastien.bau@inrs.fr

TITLE

Characterization of aerosols emitted from a direct metal deposition additive manufacturing process

RESUME

Cet article rapporte les résultats expérimentaux obtenus lors de deux campagnes de mesure réalisées dans le domaine de la fabrication additive. Dans cette étude, les aérosols émis par le procédé ainsi que l'exposition individuelle à des particules en suspension dans l'air ont été évalués, impliquant à la fois des instruments à lecture directe et des échantillonneurs conventionnels. Les champs proche et lointain ont également été caractérisés. Les résultats mettent en évidence la nécessité de porter un équipement de protection lorsqu'une intervention dans l'enceinte est requise. De plus, des effets significatifs des paramètres de fonctionnement sur les distributions en nombre et en masse des aérosols émis ont été mis en évidence.

ABSTRACT

This paper reports experimental results obtained from a measurement campaign carried out in the field of additive manufacturing. In this study, aerosols emitted by the process as well as personal exposure to airborne particles were assessed, involving both direct-reading instruments and conventional samplers. Near- and far-field were also characterized. The results highlight the need for wearing protective equipment when intervention in the enclosure is required. Strong effects of operating parameters on the number and mass size distributions of the aerosols emitted have also been noticed.

MOTS-CLÉS : Fabrication additive, métrologie temps réel, exposition professionnelle / **KEYWORDS**: Additive manufacturing, direct-reading instruments, occupational exposure

1. CONTEXTE

La fabrication additive consiste à ajouter de la matière pour former une pièce, plutôt que d'en enlever comme c'est le cas dans les procédés de fabrication courants (usinage, etc.). Cette technique de fabrication s'est développée rapidement depuis une dizaine d'années et couvre désormais une très large palette de procédés (Gao *et al.*, 2015). On distingue sept catégories de procédés différents de fabrication additive, comme le soulignent Obaton *et al.* (2016) ainsi que la norme ISO 17296-2 (2015).

Les machines de fabrication additive peuvent être classées selon deux familles principales : celles qui mettent en forme des matériaux polymères et celles qui utilisent des matériaux métalliques. Pour cette dernière famille, les risques associés à l'emploi des machines de fabrication additive proviennent principalement de l'utilisation de métaux tels que le nickel, le cobalt, le titane et les alliages associés. En effet, ces métaux, initialement présents sous forme de poudres de taille de l'ordre de 20 à 100 µm, peuvent être à l'origine de produits de dégradation lors de leur fusion (Boisselier & Sankaré, 2012).

Or, la génération de produits de dégradation thermique lors des opérations de fusion de poudres métalliques pose question, en particulier en ce qui concerne les risques sur la santé, qui demandent une caractérisation des niveaux d'exposition des salariés ainsi que la mise en œuvre et l'évaluation de l'efficacité de mesures de protection collective et individuelle adaptées. De plus, les résultats d'une enquête menée en 2017 auprès de 85 entités indiquent que de nombreuses machines de fabrication additive ne présentent pas de système de captage des émissions. 25% des machines présentes dans le secteur des institutionnels de recherche, 50% dans le secteur des services et 40% dans le secteur industriel, ne possèdent pas de système d'aspiration raccordé à la machine. Par ailleurs, la ventilation des locaux pose également question puisqu'aucun chiffre concernant les débits ou taux de renouvellement d'air n'a pu être recueilli suite à cette enquête.

Ainsi, il apparaît nécessaire de documenter les émissions des machines de fabrication additive présentes en France, ainsi que les niveaux d'expositions professionnelles associées. A ces fins, une caractérisation multimétrique des aérosols en différents points a été retenue, en accord avec les préconisations relatives aux aérosols submicroniques émises par différents auteurs (McGarry *et al.*, 2016; McGarry *et al.*, 2013; O'Shaughnessy, 2013; Shepard & Brenner, 2013).

Nous présentons ici les résultats issus de deux campagnes de mesurage conduites en 2017 et 2018 visant à évaluer les niveaux de concentration et les caractéristiques des aérosols émis par un procédé de fabrication additive métallique.

2. PARAMETRES OPERATOIRES ET STRATEGIE DE MESURE

2.1. Description de l'environnement de travail

Dans le système étudié de fabrication additive métallique, un laser de la puissance de l'ordre de 400 W.mm⁻² est utilisé pour faire fondre une quantité donnée de poudre et la projeter au moyen d'une buse en une monocouche de la forme souhaitée. L'opération est réalisée dans une enceinte de 12 m³ alimentée en air filtré (HEPA). Le taux de recirculation a été estimé à environ 25 h⁻¹.

Deux modalités ont été investiguées :

- la nature de la poudre inox 316L (alliage Fe/Cr/Ni 69/18/13) et inconel 625 (alliage Fe/Cr/Ni 5/25/70),
- le débit matière de poudre injecté par la buse buses à taux de dépôt faible « 10VX » et élevé « 24VX », ratio de débits matière ~ 3.

Pour chacune des configurations (4 configurations expérimentales distinctes), l'opération consistait à produire une pièce basique sur un cycle de ~ 30 minutes.

2.2. Stratégie de mesure

De façon à documenter les caractéristiques des aérosols, des prélèvements en vue d'analyses physicochimiques en différé couplés à des mesures en temps réel ont été réalisés (Figure 1).



Figure 1. Métrologie mise en œuvre lors des campagnes de mesurage

La stratégie mise en œuvre (Figure 2) visait à caractériser l'aérosol émis à la source (piquage au sein de l'enceinte de fabrication additive), ainsi qu'en champs proche et lointain.



Figure 2. Stratégie de prélèvement/mesure adoptée lors des campagnes de mesurage

En vue d'évaluer l'exposition individuelle, l'opérateur a également été équipé d'un appareil à lecture directe et d'un dispositif de prélèvement visant spécifiquement à la détermination de la concentration en chrome hexavalent selon la méthode M-43 (MétroPol, 2017).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Source

Les résultats de mesure indiquent qu'à la source, la concentration en nombre émise par le procédé de fabrication additive est de l'ordre de 10⁶ #/cm³, indépendamment de la nature de la poudre (inox ou inconel) et de la taille de la buse d'injection. Les distributions granulométriques obtenues (Figure 3) montrent que l'aérosol est largement submicronique, et présentent quant à elles une dépendance vis-à-vis de la buse utilisée (décalage du mode de la distribution d'un facteur ~ 1,7 entre la buse 10VX et la buse 24VX).



Figure 3. Distributions granulométriques des aérosols émis par le procédé de fabrication additive étudié

Pour les 4 configurations étudiées, les distributions massiques issues de l'analyse gravimétrique des étages d'impaction de l'impacteur Sioutas montrent la présence d'un mode principal inférieur à 100 nm et d'une population secondaire entre 1 et 10 μ m. Ceci se traduit par des concentrations en fraction alvéolaire de l'ordre de 60 à 80% de celles mesurées pour la fraction inhalable (Tableau 1). Par ailleurs, une influence de la taille de la buse peut également être notée (facteur 2 à 4 sur les concentrations massiques, jusqu'à 10 en ce qui concerne la concentration en Cr^{VI}).

Tableau 1. Concentrations massiques de l'aérosol à la source						
	Buse 10VX			Buse 24VX		
	C _M inhalable	C _M alvéolaire	[Cr ^{∨I}] inh.	C _M inhalable	C _M alvéolaire	[Cr ^{∨I}] inh.
Matériau	(mg/m ³)	(mg/m ³)	(µg/m³)	(mg/m ³)	(mg/m ³)	(µg/m³)
Inox	0,316 ± 0,002	0,19 ± 0,01	0,24 ± 0,05	0,767 ± 0,002	0,54 ± 0,02	1,5 ± 0,2
Inconel	0,315 ± 0,002	0,26 ± 0,02	0,65 ± 0,09	1,256 ± 0,002	1,02 ± 0,02	6,1 ± 0,6

3.2. Exposition

Les concentrations en nombre mesurées par les 3 DiSCmini (source, opérateur, champ proche) au cours du temps sont présentées sur la Figure 4. Les périodes indiquées par les zones grisées correspondent à des cycles de fabrication à partir de poudre d'inox à l'aide de la buse « 10VX » (14:00 à 16:00) puis « 24VX » (16:30 à 18:00).



Figure 4. Profil temporel de la concentration en nombre mesuré en 3 points lors de l'opération

La Figure 4 met en évidence l'existence de pics de concentration au niveau de l'opérateur ainsi qu'en champ proche après chaque période de fabrication, correspondant à l'ouverture de la porte par l'opérateur afin de procéder à la récupération de la pièce. Si ces événements sont de faible durée, il est possible de les éliminer en intégrant au procédé une temporisation entre la fin de fabrication et l'ouverture de la porte, qui pourrait être de l'ordre de 5 à 6 minutes compte tenu du taux de renouvellement de l'enceinte. Par ailleurs, les résultats indiquent que le niveau d'exposition de l'opérateur au chrome hexavalent est inférieur à $0,096 \mu g/m^3$, ce qui est en-deçà de la valeur limite d'exposition professionnelle de 1 $\mu g/m^3$.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude vise à caractériser les aérosols émis par un procédé de fabrication additive métallique. La stratégie de mesure repose sur l'utilisation parallèle d'une série de dispositifs de lecture directe en différents points, associés à l'échantillonnage d'aérosols en fractions conventionnelles. Les résultats indiquent une stabilité du procédé, des taux d'émission de particules élevés, ainsi que de très faibles niveaux d'exposition aux particules en suspension dans l'air dans des conditions normales. La mise en œuvre de cette stratégie de mesurage sur d'autres technologies de fabrication additive devrait permettre d'accroître les connaissances sur les émissions des procédés et les niveaux d'exposition des salariés à différents polluants.

- Boisselier, D., & Sankaré, S. (2012). Influence of powder characteristics in laser direct metal deposition of SS316L for metallic parts manufacturing. *Physics Procedia*, **39**, 455-463.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C.B., Wang, C.C.L., Shin, Y.C., Zhang, S., & Zavattieri, P.D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, **69**, 65-89.
- ISO 17296-2. (2015). Fabrication additive Principes généraux Partie 2: Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières.
- McGarry, P., Clifford, S., Knibbs, L.D., He, C., & Morawska, L. (2016). Application of multi-metric approach to characterization of particle emissions from nanotechnology and non-nanotechnology processes. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **13**, D175-D197.
- McGarry, P., Morawska, L., Knibbs, L.D., & Morris, H. (2013). Excursion guidance criteria to guide control of peak emission and exposure to airborne engineered particles. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **10**, 640-651.

MétroPol. (2017). Méthode M-43 (chrome VI). Base de données MétroPol, version 01.01.

- O'Shaughnessy, P.T. (2013). Occupational health risk to nanoparticulate exposure. *Environ. Sci.: Processes Impacts,* **15**, 49-62.
- Obaton, A., Bernard, A., Taillandier, G., & Moschetta, J. (2016). Fabrication additive: état de l'art et besoins métrologiques engendrés. *Revue Francaise de Métrologie*, **2016**, 1.
- Shepard, M.N., & Brenner, S. (2013). An occupational exposure assessment for engineered nanoparticles used in semiconductor fabrication. *Ann. Occup. Hyg.*, **58**, 251-265.