



## Expositions professionnelles lors de la fabrication additive utilisant des poudres métalliques

Cosmin Patrascu, Sébastien Bau, Frédéric Clerc, Cécile Philippot, Sébastien Artous, Joséphine Steck

### ► To cite this version:

Cosmin Patrascu, Sébastien Bau, Frédéric Clerc, Cécile Philippot, Sébastien Artous, et al.. Expositions professionnelles lors de la fabrication additive utilisant des poudres métalliques. Hygiène et Sécurité du Travail, 2021, 2021 (263), pp.45-52. cea-03337364

**HAL Id: cea-03337364**

**<https://cea.hal.science/cea-03337364>**

Submitted on 7 Sep 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Notes techniques

# EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES LORS DE LA FABRICATION ADDITIVE UTILISANT DES POUDRES MÉTALLIQUES

La fabrication additive trouve des applications dans de nombreux secteurs. Afin d'améliorer la qualité de l'évaluation des risques, l'INRS et le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) ont conçu une base de données intégrant leurs données d'émission et d'exposition recueillies au cours de campagnes de mesurages dans l'industrie de la fabrication additive utilisant des poudres métalliques.

---

COSMIN  
PATRASCU  
INRS,  
département  
Expertise  
et conseil  
technique

---

SÉBASTIEN  
BAU,  
FRÉDÉRIC  
CLERC  
INRS,  
département  
Métrologie  
des polluants

---

CÉCILE  
PHILIPPOT,  
JOSÉPHINE  
STECK,  
SÉBASTIEN  
ARTOUS  
Université  
de Grenoble-  
Alpes /  
CEA Grenoble

---

### Fabrication additive : enjeux et prévention

La fabrication additive est apparue dans les années 1980 et trouve aujourd'hui des applications dans de multiples secteurs industriels (aéronautique, automobile, médical, etc.). Elle consiste à produire une pièce en ajoutant de la matière, couche après couche, selon un passage bien précis<sup>1</sup>. Les modèles des pièces sont créés par conception assistée par ordinateur (CAO) ou en scannant une pièce existante, susceptibles d'être modifiés par la suite. Il existe sept procédés de fabrication additive définis par la norme NF ISO 17296 – Partie 2 [1]. Chaque technologie peut utiliser une multitude de matériaux : polymères, métaux, céramiques, etc. Ces matériaux peuvent se trouver sous forme de poudre, de fil ou de liquide. Dans son dernier rapport annuel, Wohlers [2] estime le marché mondial de la fabrication additive pour l'année 2019 à 11,8 milliards de dollars (Mds \$), avec une croissance annuelle de 21,2 %. La fabrication additive utilisant des matériaux métalliques représente 17,4 % du marché. En France, une étude de février 2019 commandée par l'Observatoire de la métallurgie estime à 60,6 M€ le marché français de la fabrication additive métallique, sur un total d'environ 490 M€. Les risques spécifiques liés aux procédés de fabrication additive sont le risque chimique et le risque d'incendie et d'explosion ; ils dépendent en premier lieu de la combinaison technologie – matière utilisée. Les autres risques identifiés sont liés à la machine ou sont communs à toute activité industrielle (comme le risque de chute, etc.)<sup>2</sup>. La prévention des risques dans ce secteur est propre à chaque situation, compte tenu des

différentes technologies et matériaux présents sur le marché. Cependant, peu d'études sont recensées dans la littérature sur les risques professionnels liés à ces procédés. Le sujet est néanmoins préoccupant et plusieurs instituts, comme l'IFA, le NIOSH, le HSE l'INRS ou le FIOH<sup>3</sup>, ont engagé des études. De plus, en normalisation internationale, le comité technique ISO TC 261 a créé un groupe de travail dédié à la sécurité lors des opérations de fabrication additive.

### Poudres métalliques : une base de données pour mieux évaluer les risques

Les poudres métalliques utilisées par les machines de fabrication additive sont de taille micrométrique (10 à 80 µm). Elles peuvent contenir des particules ultrafines (nanométriques) ou en former au cours du processus. Elles peuvent être constituées en tout ou partie de nickel, cobalt, chrome, cuivre ou d'autres métaux dangereux pour la santé. Certains de ces métaux (ou leurs oxydes) sont même classés cancérogènes, mutagènes ou reprotoxiques (CMR). Aux effets sur la santé connus des particules micrométriques de métaux, s'ajoutent ceux liés à l'inhalation de particules ultrafines (nanométriques) qui peuvent être différents et font encore l'objet d'études. Même si un nombre réduit de machines utilise des poudres métalliques, les enjeux pour la santé des opérateurs sont réels compte tenu de la dangerosité des matières premières et des produits potentiellement émis. Pour améliorer la qualité de l'évaluation des risques, l'INRS et le CEA ont conçu une base de données intégrant leurs données d'émission et d'exposition



## RÉSUMÉ

L'emploi de poudres métalliques lors de la fabrication additive peut présenter un risque pour les opérateurs, surtout à cause de la présence de certains métaux dangereux pour la santé comme le cobalt, le nickel ou le chrome. Pour cette activité, l'INRS et le CEA ont créé une base de données des mesures d'exposition et d'émission

disponibles. L'exploitation de ces données d'exposition permet de déterminer les situations les plus exposantes et les polluants présents. Compléter ces données avec des mesures en temps réel permet de mettre en évidence les opérations à l'origine de la majorité de l'exposition. Ces travaux montrent que les

opérateurs se trouvent dans des situations d'exposition maîtrisées la plupart du temps. Néanmoins, il existe des situations, lors des étapes de finition ou de préproduction par exemple, pour lesquelles ce n'est pas le cas, et qui nécessitent donc la mise en place des moyens de prévention supplémentaires.

### *Exposure during 3D printing using metallic powder*

*The use of metallic powder during 3D printing can present a risk for operators especially because of the presence of certain metals that are hazardous to health such as cobalt, nickel and chromium. For this activity, INRS and CEA created a database of available exposure and emission*

*measurements. This database makes it possible to determine the situations involving the greatest exposure and the contaminants present. Supplementing these data with real-time measurements reveals the operations causing most of the exposure. This work shows*

*that operators usually work in controlled exposure situations. Nevertheless, there are situations, during the finishing and pre-production stages, where this is not the case and which therefore require the implementation of additional prevention means.*

recueillies au cours de campagnes de mesurages dans l'industrie de la fabrication additive utilisant des poudres métalliques (fusion sur lit de poudre et dépôt de poudre sous énergie concentrée) ainsi que les données existantes dans la littérature [3-4]. L'exploitation de cette base de données, qui sera enrichie au cours du temps, permettra de mieux connaître les niveaux d'exposition des opérateurs et les étapes les plus exposantes pour, à terme, valider la pertinence des solutions de prévention retenues.

### Méthode d'enregistrement des données d'exposition

Avant l'enregistrement et le traitement des données, l'activité de fabrication additive a été analysée, car les risques peuvent être spécifiques à chaque étape du procédé de fabrication. La conception des pièces et le transfert numérique des pièces entre l'ordinateur et la machine de fabrication additive n'ont pas été considérés, car ces opérations ne comportent pas de risque chimique.

Un processus de fabrication est scindé en différentes étapes, pouvant être regroupées en trois phases distinctes (Cf. *Tableau 1*). Toutes les étapes ne sont pas obligatoirement présentes dans chaque entreprise ou pour chaque marque de machine. Ce découpage a pour but d'associer les opérations comportant des risques similaires. Il existe d'autres opérations potentiellement exposantes, comme le nettoyage intégral de la machine, la maintenance, le changement des filtres, etc., mais elles ne sont pas systématiques pour chaque fabrication de pièce.

Pour chaque phase, les données d'exposition disponibles, provenant de l'INRS, des services Prévention des Carsat, Cramif, CGSS, ainsi que de la littérature, ont été renseignées dans la base de données<sup>4</sup>. La marque de la machine, la nature de l'alliage, la méthode de mesure ont également été enregistrées. Pour les mesures d'exposition par prélèvement, seules les concentrations massiques des polluants ont été exploitées. Le diagnostic d'exposition a été établi selon la norme EN 689 [5]. Selon cette norme :

- lorsque moins de trois mesures sont disponibles, aucun diagnostic n'est établi ;
- lorsque trois mesures sont disponibles, la valeur maximale doit être inférieure à 10 % de la valeur limite pour envisager un diagnostic de conformité ;
- lorsque quatre mesures sont disponibles, la valeur maximale doit être inférieure à 15 % de la valeur limite pour envisager un diagnostic de conformité ;
- lorsque cinq mesures sont disponibles, la valeur maximale doit être inférieure à 20 % de la valeur limite pour envisager un diagnostic de conformité ;
- lorsque six mesures ou plus sont disponibles, un diagnostic de respect ou de dépassement de la valeur limite est calculé.

Comme indiqué dans le *Tableau 2*, les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) françaises ont été employées, quand elles existent. En revanche, en l'absence de VLEP française, le choix a été fait de comparer les résultats à des VLEP étrangères (exemples du fer, cobalt, etc.), selon la norme XP E 67-006 [6]. Les calculs de diagnostic d'exposition ont été réalisés avec le logiciel AltrexChimie (accessible sur :

← TABLEAU 1  
Phases  
d'un procédé  
de fabrication  
additive.

|                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>PRÉPRODUCTION</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Récupération de la poudre (métallique) de l'endroit de stockage ;</li> <li>- transfert de la poudre du récipient de stockage dans le récipient adapté à la machine ;</li> <li>- pesée de la poudre ;</li> <li>- alimentation en poudre de la machine ;</li> <li>- réglage de la machine.</li> </ul>                                                                                                                                                                                            |
| <b>PRODUCTION</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fabrication proprement dite de la pièce.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>FINITION</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ouverture de la machine ;</li> <li>- nettoyage de la pièce dans la machine, récupération / retrait du maximum de poudre ;</li> <li>- récupération du plateau avec la pièce ;</li> <li>- nettoyage de la pièce en dehors de la machine ;</li> <li>- découpe de la pièce du plateau de fabrication ;</li> <li>- finition de la pièce (ponçage, ébavurage, etc.) ;</li> <li>- récupération de la poudre non utilisée de la machine ;</li> <li>- tamisage de la poudre avant recyclage.</li> </ul> |

www.altrex.inrs.fr), outil d'aide à l'établissement de la stratégie de prélèvement des substances chimiques et à l'interprétation des résultats.

En complément aux prélèvements effectués de manière conventionnelle, qui renseignent sur l'exposition moyenne des salariés, des techniques de mesure en temps réel [7] peuvent également être mises en œuvre. Ainsi, des résultats de mesures en temps réel conduites par l'INRS et le CEA ont été capitalisés, en vue de compléter la caractérisation des expositions liées à des procédés de fabrication additive métallique. Seront considérées dans cet article les mesures en temps réel de concentration en nombre des particules dispersées dans l'air, exprimées en unités par  $\text{cm}^3$  ( $\#/\text{cm}^3$ ). S'il est délicat de comparer *stricto sensu* les mesures entre elles,

notamment en raison des niveaux de concentration très variables de l'aérosol de fond et des écarts pouvant être liés au calibrage des appareils utilisés, il est néanmoins possible de mettre en évidence des variations relatives des niveaux de concentration mesurés, en fonction des activités réalisées. Les aérosols émis par les procédés de fabrication additive sont majoritairement composés de particules submicroniques, typiquement inférieures à 200 nm [8]. Dès lors, les aérosols auxquels sont potentiellement exposés les travailleurs sont constitués d'agglomérats submicroniques formés suite à différents mécanismes (agglomération, coagulation, diffusion), auxquels peut s'ajouter une fraction de particules de taille plus importante provenant de la poudre de départ. Il est donc probable que les

← TABLEAU 2  
VLEP choisies pour  
l'interprétation  
des mesures  
d'exposition  
par prélèvement.

| SUBSTANCE                                                                                                  | VALEUR LIMITE UTILISÉE ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | PROVENANCE DE LA VALEUR LIMITE |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|
| Aluminium (pulvérulent)                                                                                    | 5                                                 | VLEP : France                  |
| Poussières réputées sans effet spécifique (fraction alvéolaire)                                            | 5                                                 | VLEP : France                  |
| Poussières réputées sans effet spécifique (fraction inhalable)                                             | 10                                                | VLEP : France                  |
| Fer (métal)                                                                                                | 4                                                 | VLEP : Lituanie                |
| Chrome (métal), composés de chrome inorganiques (II) et composés de chrome inorganiques (insolubles) (III) | 2                                                 | VLEP : France                  |
| Chrome hexavalent et ses composés                                                                          | 0,001                                             | VLEP : France                  |
| Nickel (métal)                                                                                             | 1                                                 | VLEP : France                  |
| Cobalt et ses composants                                                                                   | 0,005                                             | VLEP : Allemagne               |
| Manganèse et ses composés (fraction inhalable, exprimée en manganèse)                                      | 0,2                                               | VLEP : Allemagne               |
| Manganèse et ses composés (fraction alvéolaire, exprimée en manganèse)                                     | 0,05                                              | VLEP : Allemagne               |
| Titane (fraction alvéolaire)                                                                               | 5                                                 | VLEP : France                  |
| Cuivre (poussières, en Cu)                                                                                 | 1                                                 | VLEP : France                  |
| Vanadium (poussières et fumées, en $\text{V}_2\text{O}_5$ )                                                | 0,05                                              | VLEP : Autriche                |



| SUBSTANCES                                                                                                 | NOMBRE DE MESURES TOTAL | NOMBRE DE MESURES PRÉPRODUCTION | NOMBRE DE MESURES PRODUCTION | NOMBRE DE MESURES FINITION |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Poussières réputées sans effet spécifique (fraction alvéolaire)                                            | 39                      | 14                              | 9                            | 16                         |
| Poussières réputées sans effet spécifique (fraction inhalable)                                             | 32                      | 13                              | 7                            | 12                         |
| Aluminium (pulvérulent)                                                                                    | 30                      | 7                               | 11                           | 12                         |
| Fer (métal)                                                                                                | 33                      | 14                              | 6                            | 13                         |
| Chrome (métal), composés de chrome inorganiques (II) et composés de chrome inorganiques (insolubles) (III) | 17                      | 9                               | 2                            | 6                          |
| Chrome hexavalent et ses composés                                                                          | 18                      | 10                              | 0                            | 8                          |
| Nickel (métal)                                                                                             | 41                      | 19                              | 7                            | 15                         |
| Cobalt et ses composés                                                                                     | 11                      | 5                               | 1                            | 5                          |
| Manganèse et ses composés (fraction inhalable, exprimée en manganèse)                                      | 9                       | 4                               | 0                            | 5                          |
| Manganèse et ses composés (fraction alvéolaire, exprimée en manganèse)                                     | 5                       | 3                               | 0                            | 2                          |
| Titane (alvéolaire)                                                                                        | 14                      | 6                               | 2                            | 6                          |
| Cuivre (poussières, en Cu)                                                                                 | 8                       | 4                               | 3                            | 1                          |
| Vanadium (poussières et fumées, en V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )                                         | 8                       | 2                               | 0                            | 6                          |
| <b>Total</b>                                                                                               | <b>265</b>              | <b>110</b>                      | <b>48</b>                    | <b>107</b>                 |

↑ **TABLEAU 3**  
Vue d'ensemble  
des données  
d'exposition.

opérateurs soient exposés à des aérosols de granulométries différentes au cours des diverses phases du procédé [9].

Les appareils mis en œuvre (DiSCmini [10] ou compteurs de noyaux de condensation [11]) renvoient en temps réel la concentration en nombre des aérosols sur la gamme submicronique, tandis que les compteurs optiques de particules couvrent une gamme de taille de 0,3 à ≈ 20 µm [12]. De manière systématique et en accord avec les préconisations émises par l'INRS, l'Ineris et le CEA [7], une mesure de la concentration de l'aérosol de fond a été réalisée en parallèle. Si les techniques de mesure en temps réel nécessitent encore des développements, elles offrent la possibilité de déterminer les sources potentielles d'aérosols, et notamment de mettre en évidence les différentes tâches associées aux émissions (existence de pics d'exposition/émission) [12-13]. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que cette métrologie n'est pas spécifique à une substance donnée ; son utilisation en atmosphères professionnelles ne permet donc pas de distinguer les particules émises lors d'une activité de celles de l'aérosol de fond. Cette problématique implique des méthodes statistiques qui demandent encore à être développées et éprouvées [14].

## Données d'exposition par prélèvement

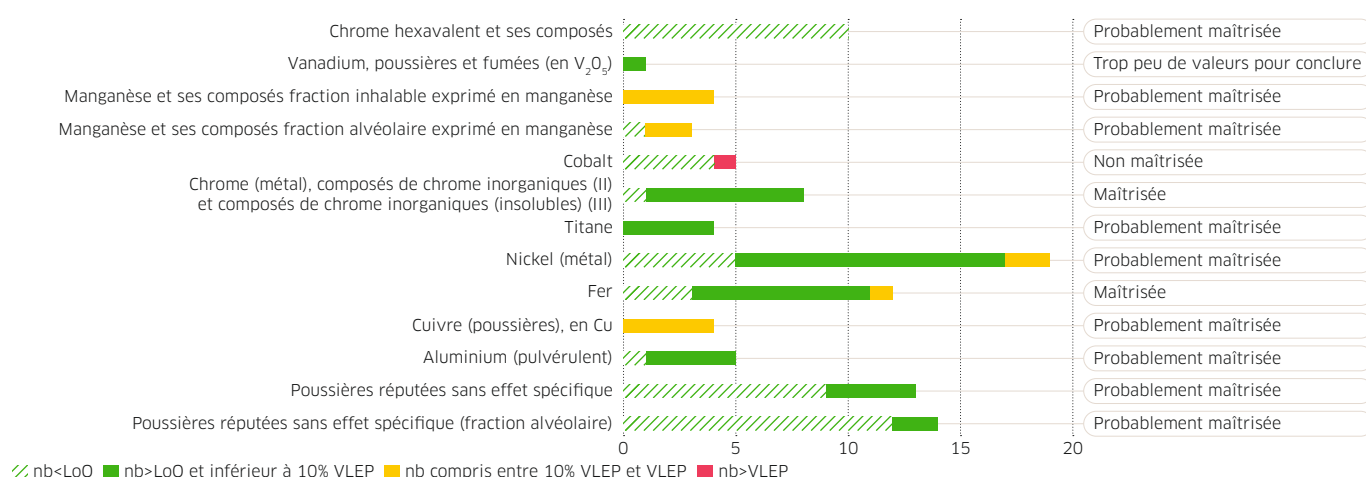
### Description des données d'exposition par prélèvement

Le *Tableau 3* synthétise les données contenues dans la base, provenant de la littérature [3-4] ou obtenues par l'INRS et les services Prévention des Carsat, Cramif, CGSS dans le cadre de campagnes de mesure. Il s'agit de données d'exposition issues de prélèvements réalisés sur les opérateurs, dans le but d'évaluer l'exposition par inhalation.

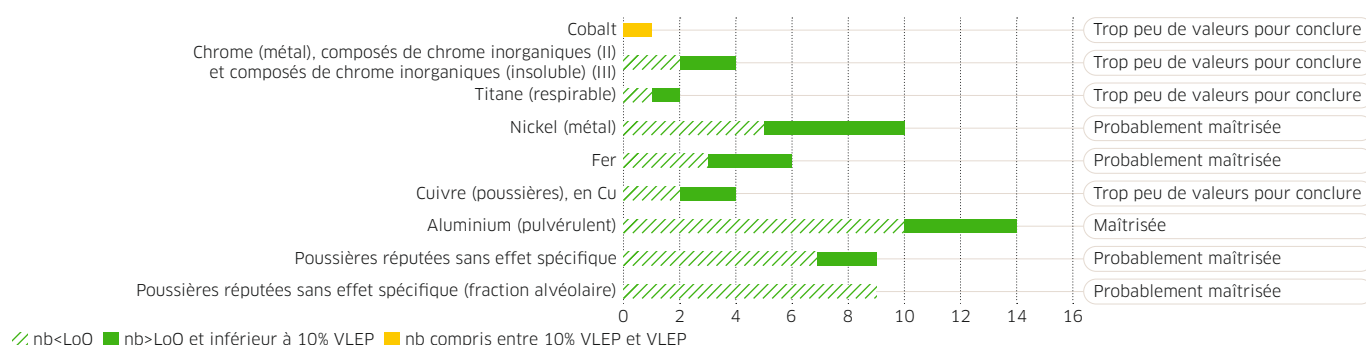
### Exploitation des données

Les données enregistrées lors des étapes de préproduction pour différents polluants (métaux et poussières sans effet spécifique) sont présentées sur la *Figure 1*. Pour faciliter la lecture, seuls les nombres de mesures par polluant associés à un code couleur ont été représentés. Les mesures inférieures à la limite de quantification (LoQ) sont indiquées en hachuré vert, toute mesure inférieure à 10 % des VLEP françaises ou étrangères selon le *Tableau 2* est en vert. Si la valeur est entre 10 % et la VLEP, elle est de couleur ocre. Pour les mesures dépassant la VLEP, la couleur choisie est le rouge.

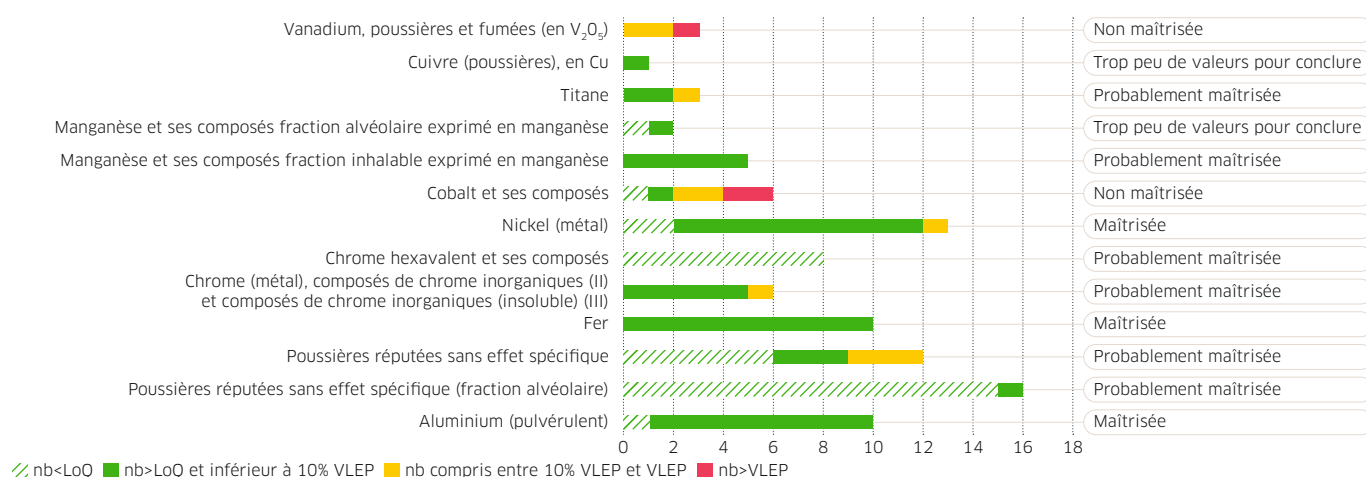
Pour cette étape, bien que la majorité des mesures soient inférieures à 10 % de la VLEP, une mesure de



↑ FIGURE 1 Répartition des mesures en fonction des polluants et de leur VLEP pour la phase de préproduction.



↑ FIGURE 2 Répartition des mesures en fonction des polluants et de leur VLEP pour la phase de production.



↑ FIGURE 3 Répartition des mesures en fonction des polluants et de leur VLEP pour la phase de finition.

dépassement de VLEP est observée pour le cobalt. D'autre part, les résultats liés au chrome hexavalent sont à interpréter avec précautions : ils sont inférieurs à la limite de quantification (LoQ), mais la limite en question est comprise entre 10 % de la VLEP et la VLEP, ce qui est incompatible avec les préconisations de la norme française NF EN 482 [15]. La même présentation des valeurs a été choisie pour

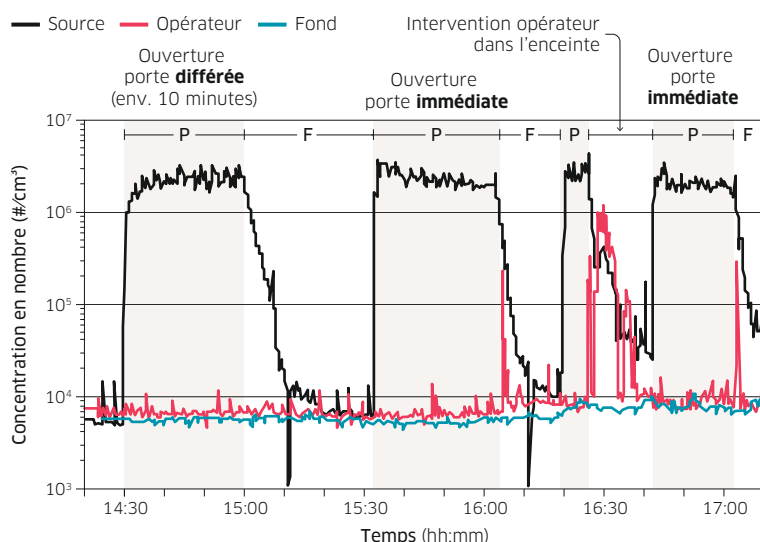
les mesures d'exposition effectuées pour l'étape de production (Cf. Figure 2). L'intégralité des mesures respectent les VLEP.

La Figure 3 présente les mesures d'exposition obtenues lors des différentes activités associées à la finition, selon les mêmes codes que les figures précédentes. Quelques situations de dépassement de la VLEP sont enregistrées pour le vanadium et pour le cobalt.

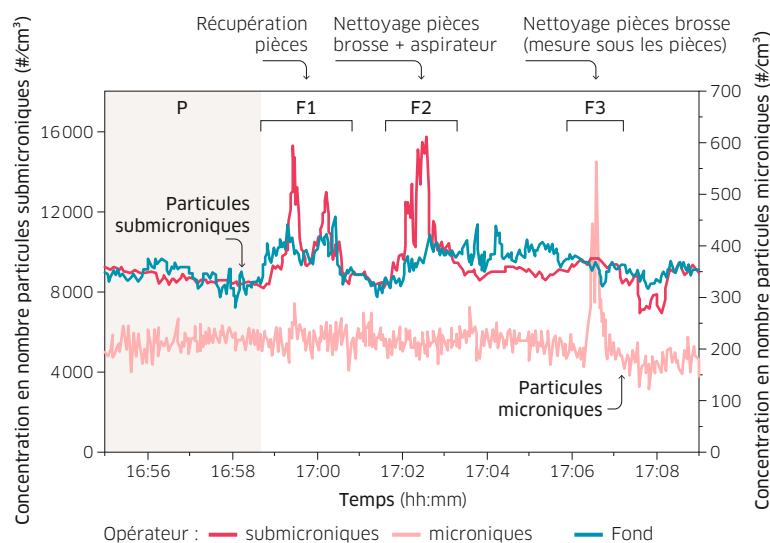


| CONCLUSION DU DIAGNOSTIC D'EXPOSITION | DÉTAILS DU DIAGNOSTIC                                        | PRÉ-PRODUCTION | PRODUCTION | FINITION  | ENSEMBLE  |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
| Exposition maîtrisée                  | Diagnostic de conformité (validé par traitement statistique) | 2              | 1          | 3         | 6         |
| Exposition probablement maîtrisée     | Nombreuses valeurs inférieures à la limite de quantification | 3              | 2          | 2         | 19        |
|                                       | Diagnostic de conformité (validé par comparaison à la VLEP)  | 5              | 2          | 2         |           |
|                                       | Autre situation                                              | 1              | 0          | 2         |           |
| Exposition non maîtrisée              | L'une des valeurs dépasse la VLEP                            | 1              | 0          | 2         | 3         |
| Non concluant                         | Trop peu de valeurs pour conclure                            | 1              | 4          | 2         | 7         |
| <b>Total</b>                          |                                                              | <b>13</b>      | <b>9</b>   | <b>13</b> | <b>35</b> |

↑ TABLEAU 4 Résumé des diagnostics effectués.



↑ FIGURE 4 Profils temporels lors de quatre cycles de fabrication additive métallique par projection de poudre. « P » = production ; « F » = finition.



↑ FIGURE 5 Profils temporels lors de la sortie et du nettoyage des pièces produites par fabrication additive par projection de poudre métallique. « P » = production ; « F » = finition.

Les données d'exposition présentées sur les figures 1 et 3 permettent d'avoir une vue d'ensemble des niveaux d'exposition rencontrés en fonction des polluants mesurés et des étapes de fabrication observées. L'exposition est « maîtrisée » ou « probablement maîtrisée » dans 25 situations sur 35 (Cf. Tableau 4).

Au cours des phases de production où les polluants sont confinés à l'intérieur des machines qui sont généralement étanches, sous atmosphère inerte, les opérateurs sont peu exposés, selon les données utilisées (cinq situations « maîtrisées » ou « probablement maîtrisées » sur neuf ; pour les autres, le faible nombre de valeurs ne permet pas de conclure). Quand l'opérateur pourrait être en contact avec la poudre métallique ou d'autres produits émis, c'est-à-dire lors des étapes de préproduction et de finition, les expositions sont « maîtrisées » ou « probablement maîtrisées » dans 20 situations sur 26. Néanmoins, il existe des situations où l'exposition est importante, supérieure à la VLEP, qui plus est pour des substances classées cancérogènes et/ou reprotoxiques selon le règlement CLP, comme le cobalt.

Quelles que soient les phases de la fabrication additive, on observe que la majorité des diagnostics d'exposition concluent à des expositions plutôt maîtrisées. Il est cependant probable que la mesure d'exposition par l'approche classique fondée sur le prélèvement d'air ne permette pas d'identifier d'éventuels pics d'exposition. À cette fin, des techniques de mesure en temps réel ont été mises en œuvre de façon complémentaire.

### Données de mesures en temps réel

Pour analyser l'évolution temporelle des émissions et des expositions, la métrologie en temps réel a été déployée. Deux exemples tirés de campagnes de mesure réalisées sur des procédés de fabrication additive par projection de poudre sont proposés. La Figure 4, issue d'une campagne de mesure [16], illustre les profils de concentration mesurés au cours

de quatre périodes de production suivies par l'ouverture de la porte de l'enceinte afin de procéder à la récupération des pièces.

Les phases de production correspondent aux zones grisées (P), au cours desquelles on enregistre des niveaux de concentration à l'intérieur de l'enceinte (émission) de l'ordre de  $2.10^6 \text{ \#}/\text{cm}^3$ . La Figure 4 met clairement en évidence que les niveaux de concentration mesurés sur opérateur présentent un pic (pouvant atteindre  $\approx 3.10^6 \text{ \#}/\text{cm}^3$ ) à la fin des phases de production n°s 2 et 4, correspondant à l'ouverture de la porte de l'enceinte et à la récupération de la pièce par l'opérateur (phase de finition, F). Ce pic n'est pas mesuré lorsque l'ouverture de la porte est différée d'une dizaine de minutes (fin de la phase de production n° 1). Enfin, un dysfonctionnement technique lors de la phase de production n° 3 a nécessité l'intervention de l'opérateur ; lors de cette période d'une dizaine de minutes, les mesures indiquent un niveau d'exposition pouvant atteindre  $10^6 \text{ \#}/\text{cm}^3$ , soit deux ordres de grandeur au-dessus de l'aérosol de fond. Par ailleurs, le profil de concentration enregistré en champ lointain (« fond »), relativement constant et non corrélé aux autres signaux, indique l'absence de transfert de particules issues de la zone de production au sein de l'atelier. De plus, au cours de la période de production, les niveaux de concentration mesurés sur opérateur sont similaires à ceux mesurés au point de mesure en champ lointain, ce qui confirme l'absence de fuite au niveau de l'enceinte. Un second exemple (Cf. Figure 5) montre les profils de concentration en particules obtenus lors de la récupération et du nettoyage de pièces.

À nouveau, la Figure 5 montre que l'étape de récupération des pièces (F1) conduit à une élévation du niveau de concentration mesuré, d'un facteur d'environ 2 par rapport à la période précédente, où la mesure de la concentration à proximité de l'opérateur est équivalente à la mesure au point de fond. Lors des opérations de nettoyage des pièces à la brosse (F2), on note également une augmentation de la concentration, du même ordre que celui observé lors de la récupération des pièces, malgré l'utilisation d'un aspirateur.

Enfin, on note une augmentation furtive de la concentration des aérosols constitués de particules de taille micronique (facteur  $\approx 2,5$ , axe de droite), lors du nettoyage des pièces à la brosse (mesure effectuée sous les pièces F3), qui correspond probablement au relargage du résidu de poudre non fusionnée. Cette observation est importante, car elle confirme la nécessité de mettre en œuvre différents appareils de mesure complémentaires, afin de couvrir l'ensemble de la gamme de taille des particules et d'éviter de conclure à l'absence de particules émises (situation de faux négatif).

Comme le suggèrent les résultats issus de l'analyse des données d'exposition par prélèvements, les mesures



© Patrick Delapierre pour l'INRS/2017

en temps réel montrent les niveaux d'exposition les plus élevés lors des phases de travail en contact avec les pièces produites ou la matière première (préparation de la charge, chargement de la machine, récupération des pièces), correspondant aux étapes de préproduction et de finition (Cf. Tableau 1). Ces périodes de travail sont généralement assez courtes, même si certaines activités telles que le nettoyage peuvent durer quelques heures.

## Discussion – Conclusion

Sur la base des données recueillies, il ressort qu'une majorité des valeurs d'exposition par prélèvement sont inférieures à la limite de quantification. Les phases conduisant à des situations exposantes sont la finition et, dans une moindre mesure, la préproduction. Ces observations sont par ailleurs étayées par les résultats de mesures en temps réel. L'analyse de la phase de fabrication ne démontre aucune situation d'exposition non maîtrisée, selon les données disponibles, ce qui est confirmé par les mesures en temps réel, avec des valeurs proches de l'aérosol de fond. Cette constatation s'explique par les besoins des procédés utilisant des poudres métalliques (fusion sur lit de poudre et dépôt de poudre sous énergie concentrée), qui fonctionnent généralement sous atmosphère contrôlée et donc avec une enceinte de production étanche dans la plupart des cas. Dans le cadre de l'évaluation du risque chimique, la définition d'une situation à risque passe par

Au titre de ses recherches, le Cetim-Certec investit depuis plusieurs années dans les procédés de fabrication additive (impression 3D). Travail sur une machine à fusion laser sur lit de poudre métallique. Très pulvérulentes, ces poudres peuvent créer un risque d'atmosphère explosive et d'incendie.



## POUR EN SAVOIR +

- INRS – *Fabrication additive ou impression 3D utilisant des poudres métalliques*. Fiche pratique de sécurité, ED 144, 2020. Accessible sur : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)
- Perspectives – La 3D fait bonne impression. *Travail & Sécurité*, juillet 2014, pp. 26-27. Accessible sur : [www.travail-et-securite.fr/ts/pages-transverses/revue.html?numRevue=752](http://www.travail-et-securite.fr/ts/pages-transverses/revue.html?numRevue=752)
- La fabrication additive : quelle prévention en entreprise ? *Hygiène & sécurité du travail*, 2021, 262, pp. 6-10. Accessible sur : [www.hst.fr](http://www.hst.fr)

la comparaison des valeurs d'exposition par prélèvement à la VLEP française<sup>5</sup>. Pour certaines substances, les valeurs nationales sont supérieures à celles de certains pays européens. Si des VLEP plus basses étaient retenues, telles que celles proposées par exemple par l'Allemagne pour le nickel ou le cuivre, de nombreuses situations seraient considérées comme non maîtrisées. Il faut par conséquent rester prudent sur l'interprétation des résultats. Cette évaluation des expositions basée sur les résultats de prélèvements conventionnels a été complétée par des mesures en temps réel, dont l'analyse permet d'objectiver les phases les

plus exposantes de finition et de préproduction. Ces données incitent à la mise en place de mesures de prévention adaptées visant à réduire les expositions professionnelles, telles que le transvasement des poudres métalliques en circuit fermé ou le travail en boîte à gant pour la récupération des pièces et leur nettoyage (Cf. *En savoir plus*). Une période de temporisation avant la récupération des pièces peut également être proposée. Enfin, une attention particulière doit accompagner les étapes de maintenance et de nettoyage des machines, qui n'ont pas été traitées dans cet article. Les mesures de protection collective classiques ne sont pas applicables à ces étapes ; des mesures spécifiques doivent alors être mises en place et l'emploi de cagoules ventilées, vêtements de protection et/ou de gants étanches aux poudres peut s'avérer nécessaire. ●

1. Voir : *La 3D fait bonne impression*. Cf. *En savoir plus*.
2. Voir : *La fabrication additive*. Cf. *En savoir plus*.
3. IFA : Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (Allemagne). NIOSH : National Institute for Occupational Safety (États-Unis). HSE : Health and Safety Executive (Royaume-Uni). FIOH : Finnish Institute of Occupational Health (Finlande).
4. Le CEA n'a procédé qu'à des mesures d'exposition en temps réel.
5. La VLEP est alors bien considérée comme un indicateur pour évaluer l'exposition, et non comme une valeur d'exposition à « atteindre ».

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF ISO 17296-2 – *Fabrication additive – Principes généraux – Partie 2 : Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières*. Afnor, 2014.
- [2] WOHLERS T.T. – *Wohlers Report 2020: 3D Printing and Additive Manufacturing, State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates Inc., 2020.
- [3] BEISSER R., BUXTRUP M., FENDLER D. ET AL. – Inhalative exposition gegenüber Metallen bei additiven Verfahren (3D-Druck). *Gefahrstoffe Reinhalt. Luft*, 2017, 77, pp. 487-496.
- [4] DU PREEZ S., DE BEER D.J., DU PLESSIS J.L. – Titanium powders used in powder bed fusion: their relevance to respiratory health. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2018, 29, pp. 94-102.
- [5] NF EN 689 – *Exposition sur les lieux de travail – Mesurage de l'exposition par inhalation d'agents chimiques – Stratégie pour vérifier la conformité à des valeurs limites d'exposition professionnelle*. Afnor, 2018.
- [6] XP E 67-006 – *Fabrication additive. Sécurité, hygiène et environnement – Exigences liées aux matériaux métalliques*. Afnor, 2020.
- [7] WITSCHGER O., LE BIHAN O., REYNIER M.D. ET AL. – Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux. *Hygiène & sécurité du travail*, 2012, 226, pp. 41-55.
- [8] MATERA V., ROUSSET D., BAU S., BÉMER D. – Émissions, distributions et analyses chimiques de particules ultrafines issues de divers procédés industriels. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 256, pp. 54-61.
- [9] PHILIPPOT C., L'ALLAIN C., ARTOUS S. ET AL. – Potential workers exposure management in metal additive manufacturing and how to manage it. In: *Proceedings of the Euro PM2018 conference*, 2018, Bilbao.
- [10] BAU S., PAYET R., WITSCHGER O. ET AL. – Mesure en temps réel de l'exposition individuelle aux nanoparticules sous forme d'aérosols : performances et exemple d'application du DiSCmini. *Hygiène & sécurité du travail*, 2021, 262, pp. 56-62.
- [11] BAU S., WITSCHGER O. – Fiche MétroPol : mesure en temps réel de la concentration en nombre d'un aérosol submicronique au moyen d'un compteur de noyaux de condensation. In: *Guide méthodologique MétroPol*, 2019, 15 p. Accessible sur : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr).
- [12] BAU S., WITSCHGER O., GALLAND B., MARTIN P. – Métrologie en temps réel de substances chimiques au poste de travail : intérêts et limites. *Hygiène & sécurité du travail*, 2015, 239, pp. 6-10. Accessible sur : [www.hst.fr](http://www.hst.fr)
- [13] GALEY L., AUDIGNON-DURAND S., BROCHARD P. ET AL. – Vers une méthode opérationnelle d'évaluation de l'exposition aux aérosols de nanoparticules par l'intégration de l'activité de travail à la mesure. *Archives des maladies professionnelles et de l'environnement*, 2020, 81, pp. 838-850.
- [14] CLERC F., NJIKI-MENGA G. H., WITSCHGER O. – Exploratory study on a statistical method to analyse time resolved data obtained during nanomaterial exposure measurements. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 429, 012003.
- [15] NF EN 482 +A1 – *Exposition sur les lieux de travail – Exigences générales concernant les performances des procédures de mesure des agents chimiques*. Afnor, 2015.
- [16] BAU S., ROUSSET D., PAYET R., KELLER F.X. – Characterizing particle emissions from a direct energy deposition additive manufacturing process and associated occupational exposure to airborne particles. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2020, 17, pp. 59-72.