

PROJET CaRPE



Caractérisation et réduction des émissions
des procédés de métallurgie des poudres
métalliques à hautes énergies

SYNTHESE



EXPERTISES

**Janv.
2023**

REMERCIEMENTS

Les auteurs, Sébastien DIEU, Christophe DUTOUQUET et Olivier LE BIHAN, remercient l'ADEME et notamment Aude-Claire Houdon, référente technique et Delphine Cottet, référente administrative pour la réalisation du projet.

Les auteurs remercient également les membres du consortium de recherche : Geoffrey Darut, Fabrice Lezzier, Franck Devestel, Pierre Picard, Alexis Vion, Cathy Berguery, Julien Roquette, Martin Morgeneyer.

A toutes celles et ceux qui ont contribué à l'avancement du projet en apportant leur expertise, notamment :

- Laurent Meunier et Jessica Queron (Unité PROX en charge des caractérisations de la qualité de l'air en proximité de sources),
- Alexis Vignes (Unité ERIP en charge de l'évaluation et du management des risques d'incendie et d'explosion dans les procédés),
- Benoit Schnuriger (Unité TPEC en charge du suivi des meilleures technologies disponibles),
- Isaline Fraboulet (Unité EMIS en charge des rejets canalisés atmosphériques et aqueux),
- Arnaud Papin, Farid Ait Ben Ahmad et Yohann Baillon (Unité ANAE en charge des analyses de microscopie).

CITATION DE CE RAPPORT

Dieu S., Darut G., Meunier L., Dutouquet C., Queron J., Vignes A., Schnuriger B., Le Bihan O. Synthèse. 14 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01
Numéro de contrat : 1881C0004

Étude réalisée par INERIS, UTBM, UTC, APS Coating Solutions, TOYAL Europe, Groupe PHOSPHORIS MP FILTER, BLUE industry & Science, BV PROTO pour ce projet financé par l'ADEME
Projet de recherche coordonné par : INERIS
Appel à projet de recherche : CORTEA

Coordination technique - ADEME : HOUDON Aude-Claire
Direction/Service : DETI / SCI

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	4
ABSTRACT	5
1. PRÉSENTATION DU PROJET	6
1.1. Contexte	6
1.2. Objectifs	6
1.3. Description des travaux réalisés	7
2. INSTRUMENTATION ET MÉTHODOLOGIE.....	8
2.1. Instrumentation.....	8
2.2. Méthodologie.....	9
3. PRINCIPAUX RÉSULTATS OBTENUS	10
3.1. La projection thermique.....	10
3.2. La fabrication additive	11
3.3. L'atomisation.....	12
4. CONCLUSION & PERSPECTIVES.....	13
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	14

RÉSUMÉ

Les procédés métallurgiques à haute température utilisent des métaux le plus souvent sous forme de poudres micrométriques dans les processus de fabrication. Cependant, il est connu que ceux-ci engendrent la production de particules fines. La législation française impose la réduction des émissions de particules et de gaz sur les lieux de travail et dans l'environnement. Malgré cela, la nature et les caractéristiques de ces émissions pour ces procédés restent mal connues. Dans ce contexte, un certain nombre d'acteurs du secteur dont les membres de ce projet pointent la nécessité de développer une meilleure maîtrise des effluents (poudres, particules, gaz) issus de ces procédés de fabrication.

L'objectif principal du projet CarPE était de se concentrer sur trois procédés (projection thermique, fabrication additive, atomisation) et d'en caractériser les rejets dans le but de mieux contrôler ces derniers. Ainsi, le projet s'est intéressé à différents types d'émissions. Les émissions canalisées dans les conduits d'évacuation ont été caractérisées en amont et en aval des systèmes de filtration et des efficacités de filtration évaluées. Le projet s'est également intéressé aux émissions diffuses à proximité des procédés de production, mais également à l'exposition des opérateurs sur site. Enfin, la pulvéulence des poudres initiales et des poudres produites a été évaluée dans un cas. Dans le cadre du projet CarPE, plusieurs sites ont été sélectionnés pour caractériser les différents types d'émission tels qu'indiqués ci-dessus. C'est ainsi que 3 campagnes de mesures utilisant un large panel d'instruments dédiés à la mesure des gaz et des particules ont été menées sur ces sites.

Les résultats ont mis en évidence dans certains cas, la production de particules nanostructurées. Malgré des efficacités de filtration élevées, certains procédés laissent échapper des nanoparticules avec des concentrations en nombre non négligeables dans l'environnement. Des événements d'émission diffuse ont pu être observés dans certains cas. Enfin, certains opérateurs se retrouvent potentiellement exposés à différents stades de la production.

En conclusion, plusieurs voies d'amélioration ont pu être mises en évidence. Le renforcement des dispositifs de filtration peut améliorer le rejet dans l'environnement. Le respect de bonnes pratiques ainsi que des éléments de protection respiratoire collective et individuelle adéquats peuvent réduire les émissions diffuses et l'exposition des opérateurs. Dans le cadre du projet, des expériences d'amélioration de captation des particules ont également été menées.

En perspective, la connaissance des morphologies, tailles, structure des particules devrait aider les industriels du secteur à dimensionner correctement leur système de filtration et éviter ainsi toute pollution. Il reste probablement encore un travail à approfondir pour éviter le plus possible l'émission non maîtrisée de particules aux postes de travail et dans l'environnement.

ABSTRACT

High temperature metallurgical processes use metals most of the time in powder form in the manufacturing process. However, it is well known that these generate fine particle production. The French regulation tend to enforce particle and gas emission reduction in the workplace and the environment. In spite of this requirement, the nature of these emissions is not well known yet. In this context, many stakeholders of this sector of which the members of this project underline the necessity to master the effluent flow (powders, particles, gas) originating from the manufacturing processes.

The main objective of this project was to focus on three processes (Thermal spraying, additive manufacturing, atomization) and to characterize the waste stream to better control it. Thus, different kind of emissions were broached in the project. Channelled emissions were characterized upstream and downstream the filtering system and filtration efficiency was assessed. Diffuse emissions were dealt with in the vicinity of the production processes. Operator exposure was also considered. Eventually, the dustiness of the initial powder and that of the produced particles was measured and the two compared. In the framework of the CarPE project, several sites were selected to characterize different kind of emissions as indicated above. Three measurement campaigns resorting to a full panel of instruments dedicated to particle and gas detection were carried out on these sites.

Results evidence in some cases production of nanostructured particles. Despite a rather high filtering efficiency, some processes release nanoparticles with high number concentrations in the environment. Diffuse emissions were observed in certain cases. Lastly, some of the operators are possibly exposed to nanoparticles at different stages of the production.

In conclusion, several improvements have been identified. The improvement of the filtration system could help controlling release at stack emission. Good manufacturing practices and use of protective equipment both collective and individual could reduce diffuse emissions and worker exposure. In the framework of this project, experiments aiming at improving particle collection were also carried out.

In view of future developments, knowledge of the morphologies, sizes, and structures of the particles should help the manufacturer dimensioning the filtration systems and avoiding pollution. Work remains to be done to avoid as much as possible particle release to the environment, diffuse emissions, and operator exposure.

1. Présentation du projet

1.1. Contexte

Les procédés métallurgiques à haute température (projection thermique, fabrication additive et atomisation) utilisent des métaux le plus souvent sous forme de poudres micrométriques dans leur processus de fabrication et cela génère la production de particules nanométriques métalliques [1] [2]. Il y a, à l'heure actuelle, un manque de connaissance sur les propriétés de ces émissions et la manière dont elles doivent être traitées (captation, confinement...) et ce, bien que les conséquences des particules ultrafines sur la santé soient déjà bien documentées. Ces particules peuvent en effet être inhalées là où les systèmes de protection individuelle et de captation font défaut [3]. La législation française en vigueur impose la réduction des émissions gazeuse et particulaire dans l'environnement. Cela est particulièrement important dans la filière industrielle Française utilisant des procédés métallurgiques à base de poudres. Parmi tous les procédés existants, la projection thermique est probablement celle qui présente le plus grand nombre de configuration à la fois en termes de sources d'énergie (plasma, flamme, arc électrique) et de matériaux utilisés (métaux, céramiques, polymères, composites etc.). Le principe de cette technologie est de combiner une source thermique avec un gaz et de fondre un matériau précurseur habituellement sous la forme de poudres micrométriques. Les particules ainsi fondues par la source de chaleur sont alors projetées vers un substrat (ou pièce à traiter). Un autre procédé métallurgique à base de poudre dont l'utilisation est croissante est la fabrication additive, en particulier la fusion laser sur lit de poudre (SLM : Selective Laser Melting). La source d'énergie est un faisceau laser utilisé pour fondre les poudres. Ce procédé génère des vapeurs métalliques. Les opérations sont menées dans une chambre fermée pendant la phase de production. Le point commun de ces deux techniques est l'utilisation de poudres comme matériau de base. Dans le cas des métaux, une méthode pour fabriquer ces poudres à partir d'un bain de métal fondu est l'atomisation. Différentes méthodes peuvent être utilisées. Il peut s'agir de souffler un jet de gaz à la surface du bain. Ou alors, souffler un jet de métal fondu entouré d'un gaz froid au travers d'une buse. Dans les deux cas des gouttelettes sont générées et celles-ci se solidifient alors rapidement pour former des poudres. Ainsi, le projet CaRPE a proposé de se focaliser sur ces trois procédés : **projection thermique, fabrication additive et atomisation.**

Quel que soit le procédé utilisé parmi les trois présentés, il y a toujours un système de captation et d'évacuation permettant de collecter / traiter les particules produites. Cependant, il existe peu d'informations sur les performances de ces systèmes. De plus, les caractéristiques de ces émissions sont très mal connues. Par ailleurs, la problématique des émissions de gaz et de particules ne concerne pas que le cœur du procédé. L'enjeu est de prendre en compte l'ensemble de la chaîne de fabrication notamment les étapes de pré- et post-procédé. Le projet CaRPE vise à documenter les connaissances scientifiques et industrielles sur les différentes émissions de ces procédés, en considérant toute la chaîne de fabrication de la poudre (précurseur) jusqu'au produit final.

1.2. Objectifs

Les objectifs du projet CaRPE sont de mieux cerner les émissions des procédés métallurgiques tels que la projection thermique, l'atomisation et la fabrication additive et de voir dans quelle mesure il est possible de réduire celles-ci en agissant en amont sur les procédés et en aval sur les systèmes de captation. Les mesures à mettre en place pour protéger le personnel et l'environnement ont également été étudiées.

Pour répondre à ces objectifs, le projet CarPE a consisté à :

1. « Documenter l'existant ... », s'appuyer sur l'étude de l'INRS [4] réalisée sur la situation française en matière d'utilisation des procédés et matériaux pour étudier les différentes émissions associées (canalisées et diffuses) afin de documenter la communauté scientifique et industrielle. Mais également de caractériser des procédés en développement actuellement comme la projection plasma de suspensions. La bibliographie sur les procédés a été mise à jour et une enquête auprès d'industriels français a été menée [5]. Cette dernière a mis en évidence que la plupart des compagnies sont équipées de procédés de projection plasma à pression atmosphérique. L'accent a donc été mis sur la projection thermique dans le cadre de CaRPE.
2. « Rechercher des voies d'amélioration... », au niveau du procédé et de la prise en charge de ses effluents. Pour cela, les émissions de procédés sélectionnés ont tout d'abord été caractérisées. Les paramètres de projection ont été étudiés de manière à réduire les émissions et modifier par exemple la granulométrie des particules émises, sans dénaturer le revêtement. Un dispositif de captage des émissions qui puisse s'adapter aux contraintes techniques industriels a été testé. En effet, un dispositif amovible comprenant plusieurs éléments dissociables et modulables peut permettre une avancée significative dans le domaine de la captation pour réduire les émissions avec ces procédés.

Les principaux attendus du projet étaient les suivants :

- Un travail exploratoire devait être mené sur le lien entre d'une part les principes physiques des procédés, et d'autre part les propriétés physico-chimiques des émissions. Des leviers potentiels ont été recherchés, et testés de manière préliminaire ;
- Une vue d'ensemble de la filière française devait être constituée, dans le but de relever les principales caractéristiques en matière de gestion des effluents ;
- Cette vue d'ensemble était notamment constituée sur la base de visites sur site, d'analyse de procédés (dont protocoles) et a mené à des propositions d'amélioration en matière de maîtrise des émissions, en prenant soin que les suggestions prennent en compte les contraintes en matière de risque accidentel ;
- Un travail de caractérisation des émissions devait être mené, incluant des études paramétriques facilitant la recherche de solutions d'amélioration ;
- 1 à 3 scénarios d'amélioration devaient être sélectionnés, mis en œuvre et évalués ;
- Une stratégie de valorisation scientifique devait permettre de faire connaître les travaux (partie non-confidentielle), de sensibiliser les chercheurs aux enjeux environnementaux, et de faire valider par les pairs les résultats de la recherche ;
- Des actions de dissémination des résultats devaient être menées à l'intention de la communauté des utilisateurs de procédés, afin de la sensibiliser aux enjeux, et de porter à sa connaissance les possibilités d'amélioration mises à jour dans le projet.

1.3. Description des travaux réalisés

Tout d'abord, une mise à jour de la bibliographie sur les émissions des procédés métallurgiques a été réalisée. Celle-ci inclut une enquête auprès des industriels sur leurs pratiques pour traiter les émissions [5]. Des visites sur sites ont ensuite été effectuées avec des mesures simplifiées pour sélectionner les sites et procédés à étudier. A l'issue de ces visites, trois campagnes de mesures ont été engagées. La première campagne était relative à la projection thermique. Les émissions canalisées, les efficacités de filtration, l'exposition des opérateurs et la pulvérulence ont été considérées.

La seconde campagne a inclus des expérimentations sur la projection thermique, la fabrication additive et l'atomisation. Là encore, les émissions canalisées, la filtration et l'exposition ont été étudiées. Des essais ont également été réalisés en modifiant les paramètres de la torche plasma pour étudier l'impact sur les émissions de la projection thermique.

Enfin, une troisième et dernière campagne sur la projection thermique a été réalisée. A cette occasion, l'amélioration de la captation des particules a été testée.

Toutes ces campagnes ont permis d'identifier des pistes d'amélioration ayant pour but la réduction des émissions sur les différents sites visités. Les résultats obtenus ont fait l'objet de plusieurs communications.

2. Instrumentation et méthodologie.

2.1. Instrumentation

	Moyens de mesure	Illustration	Données mesurées	Commentaires
Mesures de terrain	APSTM Spectromètre de mesure du diamètre aérodynamique des particules TSI [®]		Distribution en taille et concentration en nombre (Micrométrique)	Mesure temps réel
	DMS 500 Spectromètre de mesure à mobilité électrique rapide de particules Cambustion		Distribution en taille et concentration en nombre (Sub micrométrique)	Mesure temps réel
	CNC 3007[®] Compteur de noyau de condensation TSI [®]		Concentration en nombre	Mesure temps réel
	P-TRAK[®] Compteur de noyau de condensation TSI [®]		Concentration en nombre	Mesure temps réel
	DISCmini Compteur portable du nombre de nanoparticules Testo		Concentration en nombre (Sub micrométrique)	Mesure temps réel
	Grimm COP 1.108 Spectromètre portable pour aérosols Technik mbH&Co.KG		Concentration en nombre	Mesure temps réel
	MPS Préleveur de nanoparticules Ecomesure - Ineris		Prélèvement sur grille MET (Microscopie Electronique à transmission)	Mesure différée avec Microscopie Electronique à Transmission (MET)
	SMPS Scanning Mobility Particle Sizer TSI [®]		Distribution en taille et concentration en nombre (Sub micrométrique)	Mesure temps réel
	Cassette pour prélèvement sur filtre		Prélèvement des particules pour mesure de la quantité totale de poussières.	Mesure différée avec ICP / MS
	Filtres quartz pour cassettes de prélèvement		Mesures des concentrations en masse des différents éléments	

Tableau 1 : Instruments de terrain utilisés pour les mesures CaRPE

	Moyens de mesure	Illustration	Données mesurées	Commentaires
Analyses de laboratoire	Inductively Coupled Plasma / Mass Spectrometry (ICP/MS)		Concentration en masse des différents éléments	Mesures à partir des filtres
	Balance Mettler Toledo XPR2		Masse de poussières sur un filtre	Mesures à partir des filtres
	Microscope Electronique à Transmission (MET)		Morphologie, taille, composition chimique élémentaire des particules	Mesures à partir des grilles MPS
	Agitateur Vortex		Indice de pulvérulence en nombre et en masse	Mesures à partir des prélèvements de poudres

Tableau 2 : Instruments de laboratoire utilisés pour analyser les prélèvements effectués dans le cadre de CarPE

Les différents instruments utilisés au cours des différentes campagnes sont présentés dans le Tableau 1 et le Tableau 2. Le premier tableau présente les instruments de terrain alors que le second montre les instruments de laboratoire utilisés pour analyser les prélèvements de terrain.

2.2. Méthodologie

Les campagnes de mesures ont consisté à étudier les émissions de procédés de projection thermique, de fabrication additive et d'atomisation. Selon les cas, les points suivants ont été abordés :

- Les émissions canalisées et la filtration,
- Les émissions diffuses,
- L'exposition professionnelle (non réglementaire),
- La pulvérulence.

Une étude paramétrique sur la projection thermique (consistant à agir sur la source du procédé pour réduire les émissions) et des expériences d'amélioration de captation des particules ont également été réalisées. Cela a nécessité l'utilisation de plusieurs instruments présentés brièvement dans le Tableau 1 et le Tableau 2. Pour les mesures des émissions canalisées et des efficacités de filtration, des instruments tels que l'APS, le DMS 500, le SMPS, le MPS et des prélèvements sur filtres ont été effectués. Les prélèvements ont été réalisés dans les conduits en amont et en aval du système de filtration. L'analyse en poussière totale a permis d'évaluer une efficacité de filtration. Les émissions diffuses ont été analysées à l'aide de différents compteurs tels que le CPC, le DiscMini et le COP. Ces instruments sont disposés à la fois près et loin des procédés de fabrication pour évaluer une éventuelle diffusion des particules dans l'air ambiant. Pour l'exposition professionnelle, l'opérateur a été équipé d'un Disc Mini et d'un préleveur MPS afin d'examiner les particules auxquelles il peut être exposé. Enfin, la pulvérulence a été évaluée, en laboratoire, à l'aide d'un dispositif agitateur Vortex sur la base de poussières collectées sur site.

3. Principaux résultats obtenus

3.1. La projection thermique

Les expériences menées concernent les torches plasma à pression atmosphérique. Pour celles-ci, le matériau injecté dans la torche est une poudre micrométrique métallique pouvant contenir du nickel, de l'aluminium, du chrome, etc. Pour ces procédés, les **émissions canalisées** ont été analysées sur différents postes de projection thermique. Calculée en poussières totales, l'**efficacité de filtration** dépasse 90 % dans tous les cas. Cependant, les concentrations en nombre de particules nanostructurées (tailles < 1 μm avec particules primaires nanométriques voir Figure 1) sont non négligeables. En effet les poudres micrométriques métalliques injectées sont transformées en particules nanostructurées. Selon les procédés étudiés, des concentrations en nombre de l'ordre de 10^4 à 10^6 particules / cm^3 sont émises en continu. Cette valeur est de l'ordre de 10^3 particules / cm^3 lors des phases de décolmatage des filtres. Il a été observé que les fumées de la projection colmatent fortement les équipements de filtration.

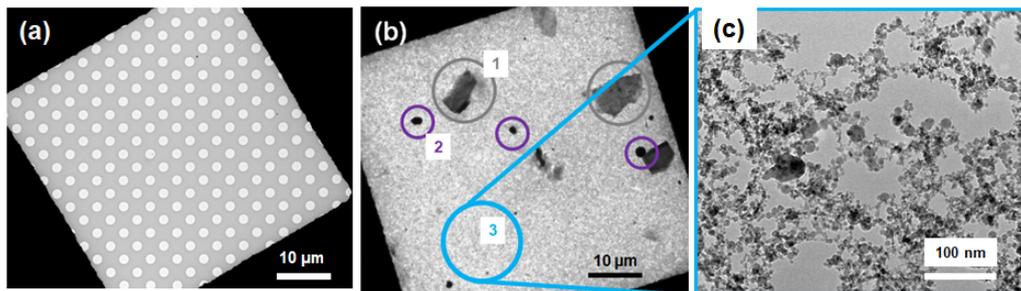


Figure 1. Particules observées par microscopie électronique avec (a) une grille vierge (b) Prélèvement de microscopie des particules contenu dans les fumées en aval de l'installation de filtration - Clichés de particules micrométriques en forme de plaquettes (1), de sphères (2), et de nombreux agrégats nanométriques (3) zoomés en (c)

La maîtrise adéquate des émissions canalisées passe également par un dimensionnement adapté du système d'aspiration afin d'éviter les dépôts dans les canalisations et d'un débit de ventilation suffisant de manière à assurer une concentration de poussières dans les canalisations inférieures à la concentration minimale d'explosion des poudres employées, concentration à partir de laquelle se forme une atmosphère explosive. Dans le même état d'esprit, il convient de s'assurer du bon dimensionnement des systèmes de protection d'explosion des systèmes de dépoussiérage en évaluant l'inflammabilité et l'explosivité des poudres utilisées et de leurs sous-produits générés pendant la phase de production. La maîtrise des risques d'explosion au sens de la Directive 1999/92/CE est ainsi essentielle dans ce type d'installation afin d'éviter des émissions massives accidentelles.

Des **émissions diffuses** ont également été constatées. A proximité de la cabine lors de l'ouverture de la porte, on constate des concentrations en nombre de l'ordre de 10^5 particules / cm^3 alors que la valeur ambiante est plutôt de l'ordre de 10^3 particules / cm^3 . Mais cela varie selon les procédés étant donné que sur une autre installation, la concentration est plutôt de 5×10^3 particules / cm^3 pour une même valeur de concentration ambiante. Enfin, une exposition de l'opérateur est constatée si celui-ci pénètre dans la cabine après la projection et sans temps d'attente (jusqu'à 10^6 particules / cm^3 avec des tailles inférieures à 700 nm et des particules primaires nanométriques). La pulvérulence des poudres présentes dans la cabine après projection s'avère 200 fois plus élevée que la pulvérulence des poudres initiales micrométriques brutes. Tant pour des raisons d'hygiène au poste de travail que de risque de formation d'une atmosphère explosive, il convient de rappeler qu'il est absolument essentiel de prohiber toute pratique de nettoyage qui pourrait aboutir à la mise en suspension de la poussière (e.g. soufflette).

En plus des mesures d'émission et de pulvérulence, des essais consistant à agir sur les paramètres des torches plasma ont été réalisés. Ils révèlent qu'il est possible d'abaisser la concentration en nombre de particules entre 0,5 et 1 μm (de 45 % environ) alors que pour la gamme de taille 1 μm – 20 μm , l'impact est moins significatif. Enfin, des expériences d'amélioration de la captation des particules ont été réalisées. Une amélioration a pu être constatée avec la mise en place de trois panneaux modulaires pouvant adopter une forme en « U ». Cependant, les meilleurs résultats sont obtenus lorsque les trois panneaux forment un angle de 180 °.

Pour les procédés par torche plasma à pression atmosphérique, les efficacités de filtration en poussières totales pour les émissions canalisées sont supérieures à 90%. Néanmoins, il a été constaté que des **particules nanostructurées** sont émises par ces procédés et rejetées dans l'environnement après les filtres, dans des quantités variables selon le procédé considéré pouvant atteindre jusqu'à des concentrations en nombre de l'ordre de 10^6 particules par cm^3 . La mise en place de dispositif de filtration adéquat à ce type de particules apparaît donc primordiale. Les essais paramétriques réalisés sur la torche plasma influent sur l'émission de particules et pourraient être une piste d'amélioration pour la réduction des émissions. D'autre part, la captation des particules peut être améliorée avec la mise en place de panneaux aspirants modulables permettant de s'approcher au plus proche de la source. Des émissions diffuses hors de la cabine sont observées dans certains cas notamment lors de phases de nettoyage et de maintenance. L'utilisation d'aspirateurs dédiés certifiés ATEX ou reliés au système canalisé de l'installation de filtration est donc à privilégier. Il convient d'autre part de s'assurer de la bonne utilisation de cet appareillage (e.g. pas d'aspiration de pièces métalliques susceptibles de créer des étincelles). Pour l'utilisation d'appareils de filtration mobiles (aspirateurs industriels), l'utilisation de filtres à très haute efficacité est recommandée (cf. norme EN 60335-2-69). L'utilisation d'air comprimé pour nettoyer les pièces ou du balai pour les sols est donc à proscrire. De plus, les procédés de projection thermique des métaux produisent un nombre important de particules nanostructurées qui colmatent les dépoussiéreurs. Il convient donc de veiller au décolmatage (perte de charge optimale) afin d'assurer une ventilation adaptée de la cabine. L'opérateur peut être exposé particulièrement lorsqu'il ne respecte pas les consignes telles que le temps d'attente d'un renouvellement d'air optimal avant d'entrer dans la cabine, ou l'utilisation d'équipements de nettoyage non adaptés (balais, air comprimé...). Par conséquent, le port d'équipements de protection respiratoire est recommandé pour toutes personnes évoluant dans le voisinage de la source. Enfin, il est essentiel de mieux identifier la zone de travail (signalisation et délimitation, accès restreint etc.) et de mettre en place un vestiaire dédié permettant d'éviter la contamination des vêtements de ville par les vêtements de travail.

3.2. La fabrication additive

Les **émissions canalisées** de machines de fabrication additive ont pu être mesurées. Sur une gamme de tailles s'étendant de 10 nm à 1 μm , la concentration en nombre de particules s'élève tout au plus à 10^4 particules par cm^3 ce qui reste faible par rapport au fond urbain (environ 8000 particules par cm^3 [6][7]). L'émission est encore plus négligeable dans la gamme de taille s'échelonnant de 500 nm à 20 μm . Il convient de noter que les émissions canalisées constituent également des risques particuliers, potentiellement source d'accidents. En effet, si les poudres d'acier qui étaient utilisées ne sont pas inflammables au sens réglementaire, elles sont susceptibles de générer des risques d'incendie de filtre lorsque ces dernières sont collectées pouvant entraîner une augmentation des émissions dans l'environnement de manière indirecte. Les caractéristiques de sécurité des sous-produits ne sont pas mentionnées dans la Fiche de Données de Sécurité qui doit donc être utilisée avec précaution dans l'évaluation des risques. Les visites préliminaires ont mis en évidence **des émissions diffuses** lors des phases de nettoyage.

Les émissions canalisées par les machines de fabrication additive considérées dans cette étude restent modestes ($< 10^4$ particules par cm^3) et proches du fond urbain. Une potentielle exposition professionnelle et des émissions diffuses ont été mises en évidence lors des phases de nettoyage. La norme française expérimentale XP-E 67-006 couvre les risques liés aux matériaux métalliques en fabrication additive sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Elle a été élaborée sur la base des bonnes pratiques existantes tant dans le domaine de l'hygiène industrielle que de la prévention des risques d'explosion. Pour la maîtrise des risques ATEX, on pourra se reporter au guide méthodologique de l'ED 945 de l'INRS établi en collaboration avec l'Ineris. Pour les émissions canalisées, il serait utile d'étudier la possibilité de parfaire la filtration des émissions de particules, par exemple en remplaçant le filtre terminal (de type H13) par un média de qualité supérieure (de type H14). Conformément aux bonnes pratiques HSE, il est recommandé d'éviter tout rejet des émissions filtrées à l'intérieur des locaux de travail, ceci afin de limiter les risques d'exposition du personnel, notamment en cas de fonctionnement en mode dégradé.

3.3. L'atomisation

Pour le procédé d'atomisation dans les **émissions canalisées**, seules les concentrations en aval du système de filtration ont été mesurées. Les mesures dans la gamme de tailles 5 nm à 1 µm étaient inférieures à la limite de quantification. Cette émission est alors considérée comme quasiment inexistante sur le procédé considéré. Dans la gamme de taille 0,5 à 20 µm, des mesures ont montré quelques pics de concentration (< 100 particules par cm³) lors des phases d'atomisation ou de nettoyage. Les analyses au microscope électronique à transmission montrent, pour cet essai, quelques rares particules sphériques de cuivre micrométriques (production de poudres de cuivre). Il n'y a pas eu d'observation de particules nanostructurées.

Les mesures des **émissions diffuses** réalisées lors des phases de production d'atomisation ont montré que la concentration en nombre de particules dans le bruit de fond de la halle et à proximité du procédé d'atomisation étaient identiques dans la gamme de tailles 10 nm – 1 µm. Les émissions diffuses dans la gamme de tailles 0,3 – 20 µm sont négligeables (< 20 particules/cm³).

L'exposition de l'opérateur a également été mesurée. Les valeurs de concentration sont stables en dehors des périodes d'accès direct au procédé d'atomisation. L'opérateur est exposé notamment lors du démontage de cyclone (concentration 10⁶ particules/cm³ sur une gamme de tailles s'échelonnant de 10 à 700 nm) et lors de la phase de nettoyage à l'air comprimé de la cuve ou du nettoyage du cyclone. Il existe donc une exposition à des particules fines lors de tâches exposantes telles que des opérations annexes de démontage, de nettoyage du procédé et de la zone de travail.

En ce qui concerne les émissions accidentelles, sur ce type de procédés, on notera qu'il est essentiel de travailler sous atmosphère inerte, des entrées d'air non maîtrisées pouvant entraîner la formation d'une atmosphère explosive à l'intérieur du procédé et par suite un risque d'explosion pouvant entraîner la perte de confinement du procédé et donc une émission massive de particules dans l'air. On notera également que la collecte des poudres peut constituer un point critique, les poudres étant sèches et très pulvérulentes. En cas de dysfonctionnement au niveau des systèmes de collecte, la formation d'une atmosphère explosive est ainsi possible. En cas d'inflammation, l'explosion pourrait mettre en suspension les poudres présentes et favoriser une émission non contrôlée dans l'environnement.

Les émissions canalisées du procédé d'atomisation considéré dans cette étude restent modestes (< 100 particules par cm³). En proximité de la tour d'atomisation, aucune émission diffuse de particules dans les gammes de tailles 0,3 – 20 µm et 10 nm et 1 µm n'a été mesurée. Cependant, l'opérateur se trouve potentiellement exposé lors de tâches exposantes telles que les phases de nettoyage et de démontage. De plus, les observations qualitatives du transfert d'une partie du procédé pour le nettoyage créent une exposition indirecte vers d'autres opérateurs de la plateforme. Quelques pistes d'amélioration ont été suggérées pour réduire les émissions et les expositions. Un petit réceptacle a été mis en place de telle sorte que les poudres ne tombent pas au sol lors de l'ouverture de la tour d'atomisation. Il a été suggéré de réduire l'accès à la zone d'atomisation lors des opérations de nettoyage et de démontage afin d'éviter les expositions dites « passives ». Un personnel non équipé présent dans la zone pourrait être exposé. Pour le démontage notamment du cyclone, il a été suggéré de réaliser si cela est possible le nettoyage à l'intérieur de la tour d'atomisation afin d'éviter le transfert de polluant et de contaminer d'autres zones par déplacement des éléments souillés par chariots mais aussi de récupérer l'eau de nettoyage et les particules dans un bac de décantation liquide pour un meilleur confinement et gestion des déchets. Enfin, il est essentiel de mettre en place un vestiaire dédié permettant d'éviter la contamination des vêtements de ville par les vêtements de travail.

4. Conclusion & perspectives

L'objectif du projet CarPE était de documenter les émissions de divers procédés métallurgiques à poudres et de voir dans quelles mesures celles-ci pouvaient être réduites, mais aussi d'évaluer de possibles actions à mettre en œuvre pour protéger le travailleur et l'environnement. Dans ce projet, trois procédés que sont la projection thermique à pression atmosphérique, la fabrication additive et l'atomisation avaient été sélectionnés. Les émissions canalisées et les efficacités de filtrations, les émissions diffuses, les possibles expositions de l'opérateur et la problématique de pulvérencence des poudres ont été abordés. Les résultats des mesures varient selon les procédés. Ainsi, bien que les efficacités de filtration en poussières totales des rejets canalisés de la projection thermique dépassent 90%, il ressort que des particules nanostructurées sont émises en nombre par ces procédés et rejetés dans l'environnement après les filtres (dans des quantités variables selon le procédé considéré). Les études menées dans le projet CarPE font état d'émissions diffuses et d'une possible exposition des travailleurs pour la plupart des procédés et ce surtout lors des phases de maintenance (démontage, nettoyage, etc.). Des observations qualitatives montrent également que des problématiques d'émissions diffuses et d'expositions professionnelles peuvent survenir dans les phases de stockage, de transport et de traitement des déchets. Toutes les observations réalisées suggèrent la mise en place de bonnes pratiques, de règles à respecter pour réduire les émissions canalisées et diffuses. Ainsi, l'une des études réalisées dans ce projet sur les émissions canalisées a amené l'un des partenaires à faire évoluer son dispositif de filtration. Pour éviter les émissions diffuses, des moyens peuvent être mis en place tel l'aspirateur à poussières installé au niveau de ces procédés par l'un des partenaires et relié via un conduit d'évacuation à une installation de filtration. Celui-ci évite donc d'utiliser balais et jets d'air pour le nettoyage. Enfin, les mesures sur opérateurs ont été l'occasion d'une prise de conscience des risques que font peser les émissions sur la santé des travailleurs et justifient le port obligatoire de protections respiratoires adéquates. Sur la base des mesures réalisées dans le cadre de ce projet, les procédés de projection thermique ont généré des particules nanométriques métalliques (nickel, aluminium, chrome, etc.) au niveau des postes de travail. Pour les trois procédés métallurgiques considérés, les émissions de particules sont sous forme d'oxydes métalliques et constitue donc un risque chimique [8] essentiellement sous forme nanométrique. On notera que la maîtrise des émissions dans l'environnement passe par une maîtrise des émissions accidentelles et donc par une évaluation de la sécurité des procédés et des risques de dispersion, d'incendie et d'explosion, mais également, en fonctionnement normal, par une analyse des risques de formation et d'inflammation des atmosphères explosives. On gardera à l'esprit d'ailleurs que ces analyses ne peuvent pas se reposer uniquement sur les données disponibles dans les Fiches de Données de Sécurité qui concernent exclusivement les produits et non pas les sous-produits dont le profil de sécurité peut différer totalement et qu'il est souvent nécessaire de caractériser l'inflammabilité et l'explosivité des produits utilisés afin de maîtriser les risques accidentels tout au long des processus de fabrication.

En termes de perspectives, plusieurs postes d'émissions diffuses ont été découverts au cours des campagnes sans que ces émissions puissent être quantifiées (transport, traitement des déchets). Ce point mériterait d'être approfondi afin d'améliorer la réduction des émissions. Enfin, une piste intéressante de réduction à la source des émissions mériterait d'être creusée. En effet, en étudiant les paramètres des différents procédés (poudres utilisées, puissance du plasma, gaz vecteurs etc.), il apparaît possible d'après les études préliminaires réalisées dans CarPE de réduire les émissions. Mais encore faut-il que cela soit réalisé sans altération des pièces à traiter. De plus, le travail sur la captation à la source engagé dans CarPE mériterait d'être poursuivi également pour la réduction des émissions. Enfin, il serait intéressant de réaliser une surveillance de la qualité de l'air autour de ce type de sites afin d'évaluer leur potentiel impact sur la population générale, notamment le procédé de projection thermique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] W. J. Trompetter, T. Ancelet, P. K. Davy, and J. Kennedy, "Fugitive emissions from nanopowder manufacturing," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 18, no. 7, p. 203, Jul. 2016, doi: 10.1007/s11051-016-3509-8.
- [2] A. B. Stefaniak et al., "Insights Into Emissions and Exposures From Use of Industrial-Scale Additive Manufacturing Machines," *Saf. Health Work*, vol. 10, no. 2, pp. 229–236, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.shaw.2018.10.003.
- [3] L. Reijnders, "Cleaner nanotechnology and hazard reduction of manufactured nanoparticles," *J. Clean. Prod.*, vol. 14, no. 2, pp. 124–133, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.jclepro.2005.03.018.
- [4] B. Savary, "Panorama de la projection thermique en France : Résultats de l'enquête de 2012. Rapport INRS," 2014.
- [5] G. Darut et al., "State of the art of particle emissions in thermal spraying and other high energy processes based on metal powders," *J. Clean. Prod.*, vol. 303, p. 126952, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126952.
- [6] O. Le Bihan, L. Malherbe, and A. Ustache, "Connaissance du nombre et de la distribution granulométrique des particules submicroniques - Suivi dans le temps, métrologie : bilan des travaux 2003-2011," *LCSQA*, 2011.
- [7] F. Gaie-Levrel and A. Ustache, "Bilan des niveaux de concentrations particulières en nombre au sein du dispositif national en comparaison à l'échelle européenne," *LCSQA*, 2021.
- [8] G. Mater and B. Savary, "Projection thermique : état des lieux en 2012," *Hygiène sécurité du Trav.*, vol. 236, 2014.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



PROJET CARPE Caractérisation et réduction des émissions des procédés de métallurgie des poudres métalliques à hautes énergies

Le projet CarPE a pour originalité l'étude des émissions particulières canalisées et diffuses des procédés de métallurgie des poudres métalliques. En plus de ces émissions, l'efficacité de filtration, l'exposition des personnels ainsi que la pulvéulence des poudres ont également été suivies.

L'objectif était la réduction de l'ensemble de ces émissions en combinant au préalable une étude bibliographique, des campagnes de mesures et pour finir la recherche de voies d'amélioration. Le projet s'est donc focalisé sur trois procédés que sont la projection thermique à pression atmosphérique, la fabrication additive et l'atomisation.

Pour les procédés de projection thermique testés dans ce projet, bien que les efficacités de filtration en poussières totales dépassent 90 %, il a été mis en évidence l'émission de particules nanostructurées dans des proportions non négligeables. Pour tous les procédés, les émissions diffuses et de possibles expositions ont pu être mises en évidence avec des disparités selon les installations.

Les émissions canalisées et diffuses, les efficacités de filtration ainsi que la pulvéulence des poudres ont pu être étudiées pour des procédés de métallurgie des poudres métalliques tels que la projection thermique, la fabrication additive et l'atomisation. Ainsi, les émissions ont pu être caractérisées dans le but de les réduire pour une meilleure protection des travailleurs et de l'environnement.

