

Notes techniques

INTÉRÊTS ET OPTIMISATION DES PRÉLÈVEMENTS D'AÉROSOLS PAR IMPACTEURS EN CASCADE

Les impacteurs en cascade permettent de collecter séparément des particules de l'air (aérosols) en fonction de leur diamètre. La distribution granulométrique en masse d'aérosols est alors déterminée par analyse gravimétrique des supports de collecte. Elle peut être suivie d'analyses chimiques, qui constituent un réel apport pour la compréhension des effets de ces particules sur la santé. Des travaux de l'INRS, présentés dans cet article, viennent compléter les connaissances dans ce domaine.

VIRGINIE
MATERA,
NAÏMA
GAUDEL,
SÉBASTIEN
BAU
INRS,
département
Métrologie
des polluants

Intérêt des prélèvements par impacteurs en cascade et objectifs des travaux

Les impacteurs en cascade permettent de collecter des particules sur de larges gammes de taille (nanométriques à micrométriques). Leur principe de fonctionnement est rappelé dans l'*Encadré 1*. Ces outils sont une aide précieuse à double titre, puisqu'ils permettent à la fois de documenter les distributions en taille des aérosols rencontrés dans l'air des lieux de travail et de disposer d'échantillons pouvant être ensuite caractérisés par le biais d'analyses complémentaires (chimiques ou microscopiques). Cette caractérisation granulométrique et chimique des aérosols représente un réel apport en matière de compréhension des effets sanitaires des expositions rencontrées [1]. Ceci est essentiellement lié au fait que la taille des particules gouverne l'endroit où elles se déposent dans l'appareil respiratoire [2].

De plus, la granulométrie est une donnée d'entrée, lorsqu'on souhaite transposer les résultats des mesures d'exposition en termes de « dose » au poumon [3], dimensionner des éléments de protection collective (captage, filtration...) ou encore, évaluer le transfert des particules dans l'espace des locaux. Enfin, dans une moindre mesure, la connaissance de la distribution granulométrique des aérosols permet de juger *a posteriori* de la pertinence de l'utilisation d'un instrument de mesure ou d'un dispositif d'échantillonnage donné.

Actuellement se pose toujours la question du (des) indicateur(s) le(s) plus pertinent(s) en matière de caractérisation (nombre, masse, surface spécifique des particules...) et donc d'évaluation des expositions par inhalation, notamment en ce qui concerne les expositions aux particules ultrafines (PUF). Parmi

les activités potentiellement concernées, il est possible de citer par exemple le soudage, l'oxycoupage, la découpe laser ou encore la fabrication additive [4]. La granulométrie des aérosols peut également être déterminée par des appareillages de métrologie en temps réel, qui se sont démocratisés ces dernières années [5]. Néanmoins, peu d'entre eux fournissent la distribution granulométrique des particules selon la métrique « masse ». Lorsque c'est le cas, elle est estimée par calcul sur la base d'hypothèses relatives à la forme et à la masse volumique des particules. Dans ce contexte, les prélèvements par impacteurs en cascade constituent la seule possibilité d'accéder à la distribution en masse réelle d'un aérosol, intégrée sur la durée d'un poste de travail, par la collecte physique de matière associée à une analyse gravimétrique et/ou chimique. De plus, contrairement aux appareillages en temps réel, ils présentent l'intérêt de ne pas nécessiter de maintenance particulière. Les objectifs de ces travaux consistent à évaluer, par une approche pragmatique, les performances de différents impacteurs en cascade et ainsi, proposer une méthode de prélèvement efficace, simple à mettre en œuvre et reproductible, notamment pour le prélèvement de particules ultrafines solides.

Principales caractéristiques des quatre impacteurs étudiés

Il existe sur le marché un certain nombre de dispositifs de prélèvement par impaction. Ils se distinguent selon leur utilisation (prélèvement individuel ou d'ambiance), la gamme de granulométrie couverte ou encore la nature des supports de collecte. Les principales caractéristiques des quatre impacteurs qui ont été étudiés sont détaillées dans le *Tableau 1*.

RÉSUMÉ

Les impacteurs en cascade, au-delà de la détermination de la distribution en taille d'un aérosol, permettent de collecter des échantillons pouvant être ensuite caractérisés par le biais d'analyses complémentaires. Or, quel que soit le dispositif considéré, l'expérience montre que les prélèvements associés

sont peu reproductibles et donc, difficilement exploitables en l'état. Des travaux de l'INRS, menés sur quatre impacteurs différents, ont permis de proposer une méthode de prélèvement efficace, facile à mettre en œuvre et reproductible, notamment pour le prélèvement des particules ultrafines (PUF), dans

un contexte d'exposition aux particules métalliques. De plus, un impacteur en cascade individuel, jusqu'alors peu déployé en hygiène industrielle, s'est révélé avoir des performances intéressantes, avec une précision remarquable.

BENEFITS AND OPTIMISATION OF AEROSOL SAMPLING BY CASCADE IMPACTORS

Cascade impactors, in addition to determining the size distribution of an aerosol, collect samples that can then be characterised through additional analyses. However, regardless of the device in question, experience shows that the associated samples

are not reproducible and therefore hard to exploit as it stands. Work by INRS, done on four different impactors, made it possible to propose an efficient sampling method, which is easy to implement and reproducible, in particular for sampling ultrafine

particles, in situations involving exposure to metallic particles. Moreover, a personal cascade impactor, hardly used until now in industrial hygiene, shows good results with remarkable precision.

Le DLPI*, le Marple et le Sioutas sont les plus classiquement rencontrés en hygiène industrielle et en environnement, contrairement au Mini-MOUDI 135 dans sa version « 8 étages » (prélèvement individuel), qui reste à ce jour peu déployé sur le terrain.

La Figure 1 propose une représentation synthétique des diamètres aérodynamiques de coupure de chaque étage pour les quatre impacteurs étudiés (données constructeur). Elle permet d'apprécier la diversité du nombre et de la taille des classes granulométriques en fonction de la taille des particules collectées.

La démarche choisie est basée sur la comparaison des distributions granulométriques obtenues par les différents impacteurs sur des aérosols d'essais produits en laboratoire, et l'optimisation de la préparation des supports de collecte, en particulier leur graissage.

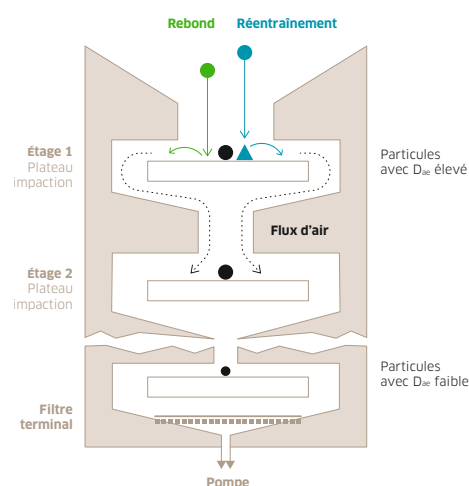
Quels sont les freins au déploiement de ce type de prélèvement ?

Des freins existent quant au déploiement des impacteurs en cascade en entreprise. En plus de potentielles difficultés de mise en œuvre sur le terrain, il existe deux « artéfacts », connus et bien documentés, lors du prélèvement de particules solides avec de tels dispositifs. Ils sont illustrés dans la Figure E1 (Cf. Encadré 1) et concernent l'ensemble des impacteurs.

• **Le premier artéfact** est le phénomène de **réentraînement des particules**, qui est favorisé lorsque la charge en particules sur la surface d'impaction est importante. Les particules sont alors éjectées, reprises dans les lignes de courant, et entraînées vers les étages d'impaction suivants. Pour éviter ce phénomène, il est important d'adapter le temps d'échantillonnage en fonction de l'empoussièrément, pour s'affranchir d'un chargement des supports trop important. Il s'agit de déterminer la durée optimum de prélèvement permettant la collecte d'une quantité de matière suffisante pour les analyses ultérieures









ENCADRÉ 1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN IMPACTEUR EN CASCADE

Pour un débit d'air donné, le flux est accéléré tout au long de la colonne d'impaction, en traversant un ensemble de buses (ou ajutages) de plus en plus fines. Des plateaux d'impaction, perpendiculaires au flux d'air, permettent de maintenir le support d'impaction. L'inertie des particules (fonction de leur masse et donc de leur taille, pour des particules de densité équivalente) est telle que, pour une vitesse d'air donnée, elles ne pourront plus suivre les lignes de courant qui contournent le plateau d'impaction et viendront s'impacter sur ce plateau (Cf. Figure E1). La vitesse de l'air augmentant, les particules les plus grosses sont ainsi collectées en premier, puis les particules de plus en plus fines sur les étages suivants. La surface de collecte comporte un média (filtre ou membrane), habituellement enduit d'un revêtement cohésif, dans le but de limiter les deux principaux artéfacts connus lors de la ségrégation des particules, à savoir le rebond et le réentraînement (illustrés sur la Figure E1). Généralement, la colonne d'impaction contient un filtre terminal avant la sortie d'air vers la pompe.

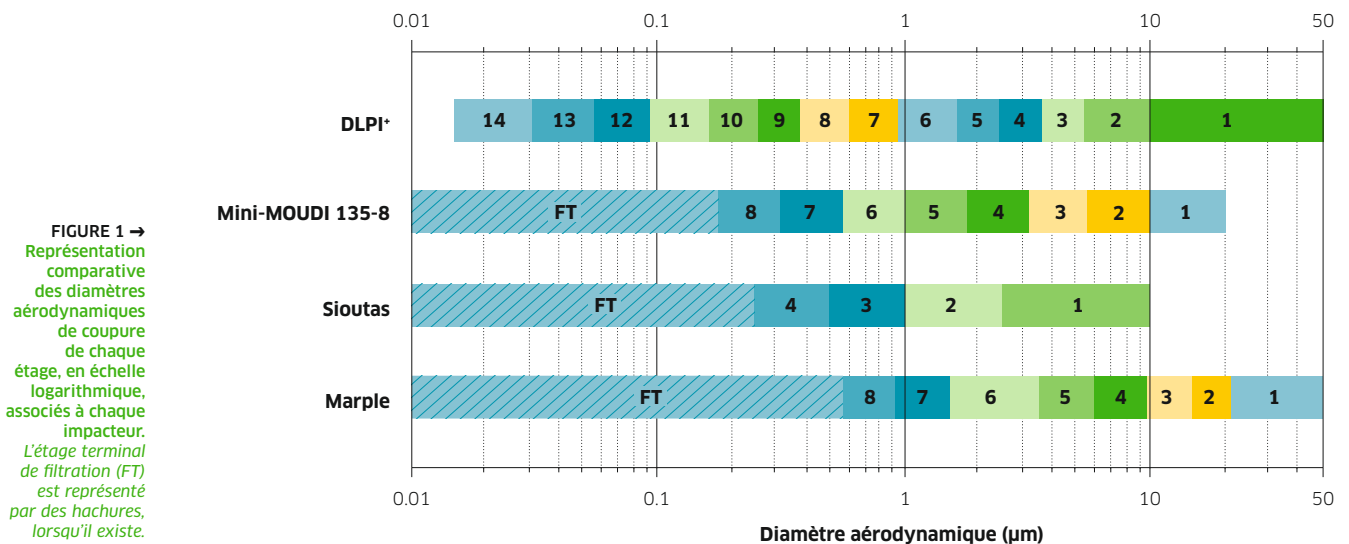


↑ Photographie d'un aérosol collecté sur un étage d'impaction d'un impacteur en cascade.

← FIGURE E1 Principe de fonctionnement d'un impacteur en cascade et artéfacts associés (D_{ae} : diamètre aérodynamique).

IMPACTEUR	DLPI*	MARPLE	SIOUTAS	MINI-MOUDI 135-8
Étage d'impaction avec support prélevé				
Vue générale du dispositif de prélèvement				
Nature du prélèvement	Ambiance	Individuel	Individuel	Individuel
Nombre d'étages (+ filtre terminal)	14	8 (+1)	4 (+1)	8 (+1)
Débit (L.min ⁻¹)	10	2	9	2
Pression d'utilisation	Basse pression (40 mbar)	Atmosphérique	Atmosphérique	Atmosphérique
Avantages/Intérêts	<ul style="list-style-type: none"> Débit élevé Résolution de la distribution granulométrique Nature du support de prélèvement adaptable 	<ul style="list-style-type: none"> Résolution de la distribution granulométrique importante pour un dispositif individuel 	<ul style="list-style-type: none"> Débit élevé Nature du support de prélèvement adaptable Graissage non préconisé 	<ul style="list-style-type: none"> Résolution de distribution granulométrique importante pour un dispositif individuel Nature du support de prélèvement adaptable
Limitations	<ul style="list-style-type: none"> Maniabilité (pompe à vide) Dépôts sur les parois favorisés Basse pression incompatible avec le prélèvement de composés volatils ou semi-volatils 	<ul style="list-style-type: none"> Supports de prélèvement spécifiques Débit faible (information à répartir sur 8 étages) 	<ul style="list-style-type: none"> Résolution de la distribution granulométrique faible (4 étages) 	<ul style="list-style-type: none"> Débit faible (information à répartir sur 8 étages)

↑ TABLEAU 1 Principaux avantages, caractéristiques et limitations des impacteurs étudiés.



sans surcharger les supports de collecte. Une métrologie complémentaire (en temps réel) lors du prélèvement permet, par exemple, de contrôler la concentration au cours du temps.

• **Le second artefact** est dû aux phénomènes de *rebond des particules* : ces dernières peuvent rebondir sur l'étage d'impaction, être reprises par les lignes de courants, pour être finalement impactées, comme dans le cas du réentraînement, sur les étages suivants, voire sur le filtre terminal.

Il est à noter que, dans le cadre de prélèvements de particules liquides, ces phénomènes sont limités compte tenu des mécanismes physiques mis en jeu. Dans le cas de particules solides, le principal effet de ces phénomènes est une distribution de taille mesurée déplacée vers des étages d'impaction correspondant à de plus petits diamètres de particules. Le graissage des supports de collecte est alors préconisé pour limiter ces phénomènes, notamment lorsque les supports de prélèvement sont

ENCADRÉ 2

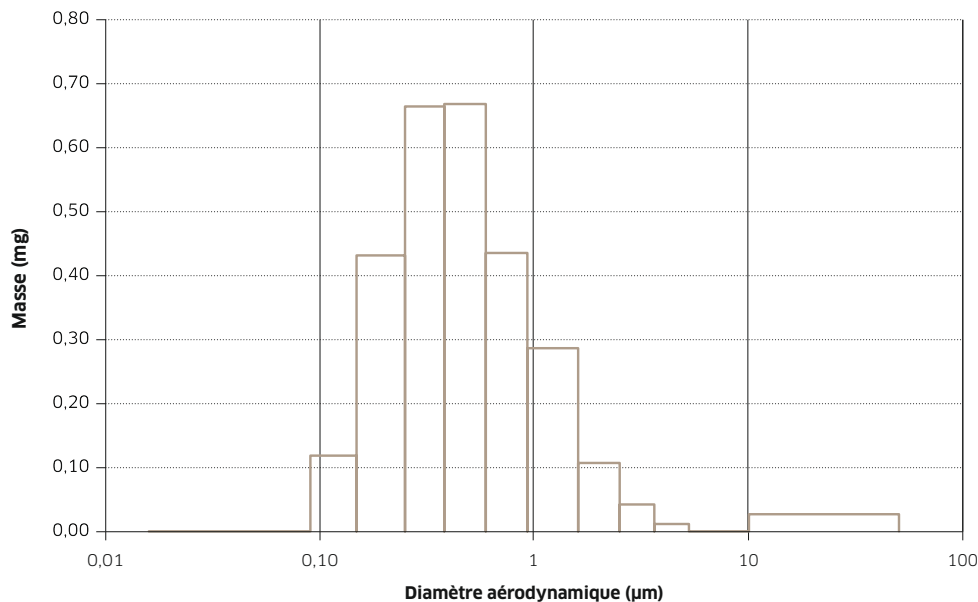
COMMENT REPRÉSENTER ET COMPARER SIMPLEMENT DES DONNÉES ISSUES D'UN PRÉLÈVEMENT PAR IMPACTEUR EN CASCADE ?

Après avoir réalisé un prélèvement d'aérosol par un impacteur en cascade, la masse d'aérosol collectée sur chaque étage d'impaction, ainsi que sur le filtre terminal, est obtenue par une analyse gravimétrique (Cf. *Base de données MétoPol*¹). Cela permet de représenter la distribution granulométrique massique de l'aérosol, afin de décrire la façon dont la masse des particules est répartie en fonction de leur taille. Cette distribution peut être représentée sous forme d'un histogramme avec, en abscisse, les différents étages d'impaction définis par les diamètres de coupures inférieurs et supérieurs (exprimés en diamètre aérodynamique) et, en ordonnée, la grandeur mesurée. Plusieurs types de grandeur mesurée peuvent être représentés : masse collectée, concentration massique (calculée à partir du volume d'air prélevé) ou encore, masse

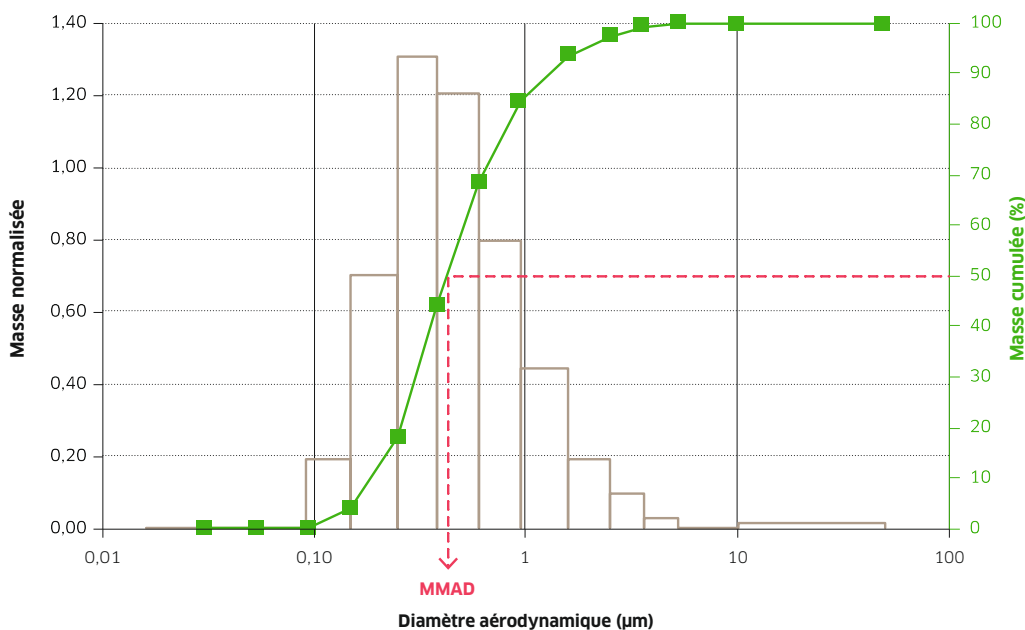
normalisée (voir un exemple sur la *Figure E2*).

Cette dernière permet de prendre en compte la largeur de la gamme de diamètres collectée par chaque étage, et de normaliser par la masse totale collectée.

À partir de la représentation en histogramme normalisé, la courbe de fréquences cumulées en masse peut être obtenue (en vert sur la *Figure E3*). Cela permet alors de déterminer le diamètre aérodynamique médian en masse (MMAD, pour *Mass Median Aerodynamic Diameter*), qui représente le diamètre pour lequel 50 % de la masse collectée est constituée de particules inférieures, et 50 % de la masse est constituée de particules supérieures à ce MMAD. Il est ainsi possible de comparer plus facilement des distributions granulométriques issues de différents mesurages.

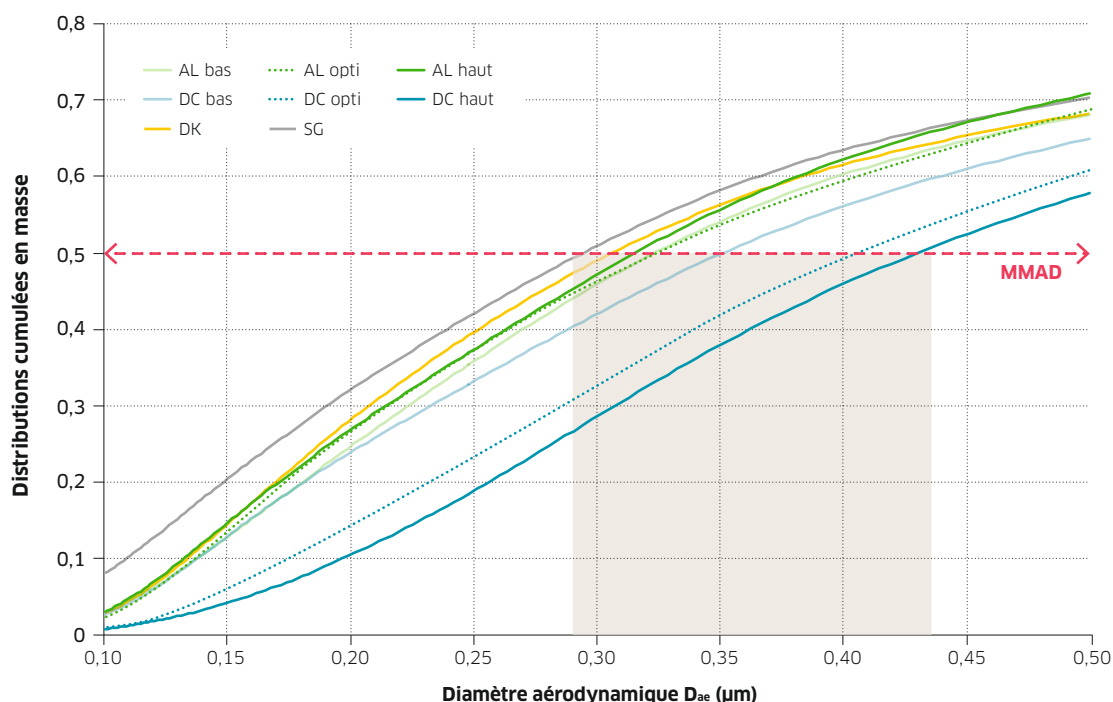


← FIGURE E2
Distribution granulométrique en masse sous forme d'histogramme.



← FIGURE E3
Histogramme normalisé à partir des données de la Figure E2 (prise en compte de la largeur de chaque étage, et normalisation par la masse totale collectée). Courbe de fréquences cumulées en masse correspondante, avec représentation schématique du MMAD.

FIGURE 2 → Distributions granulométriques cumulées en masse obtenues avec un DLPI+, lors de la génération de fumées de soudage, avec des supports graissés (AL, DC, DK), sans graisse (SG) et des charges en graisse variables (bas, opti et haut).



des membranes lisses (PVC, ester de cellulose). La graisse absorbe l'énergie cinétique des particules lors de l'impact afin de limiter leur rebond, et va créer une cohésion entre les particules collectées (par capillarité) afin de limiter leur réentraînement [6, 7]. Néanmoins, que ce soit dans la littérature spécialisée ou dans les préconisations des constructeurs, il n'existe pas de consensus sur la nature et la quantité de graisse optimales permettant de limiter ces artefacts de manière significative.

Au-delà du rebond et du réentraînement des particules, dont les effets vont influencer la distribution de taille des particules, la problématique du dépôt sur les parois, commune à tous les impacteurs, peut limiter leur utilisation s'il est question de déterminer une masse totale. Il est nécessaire pour cela de déployer en parallèle un dispositif de prélèvement de la masse totale (cassette, porte-filtre), afin d'avoir accès à cette information [8].

Des outils permettant de représenter et de comparer simplement les données obtenues par gravimétrie, suite à un prélèvement par impacteur en cascade, sont proposés dans l'Encadré 2.

Lors de ces travaux, la plupart des essais d'optimisation du graissage ont été effectués sur l'impacteur basse pression DLPI+ dédié aux prélèvements d'ambiance, cas le plus défavorable en matière de stabilité de la graisse et/ou d'artefacts qui dégradent le processus de ségrégation des particules, en raison des vitesses d'air les plus élevées dans ce dispositif.

Optimisation du graissage des supports

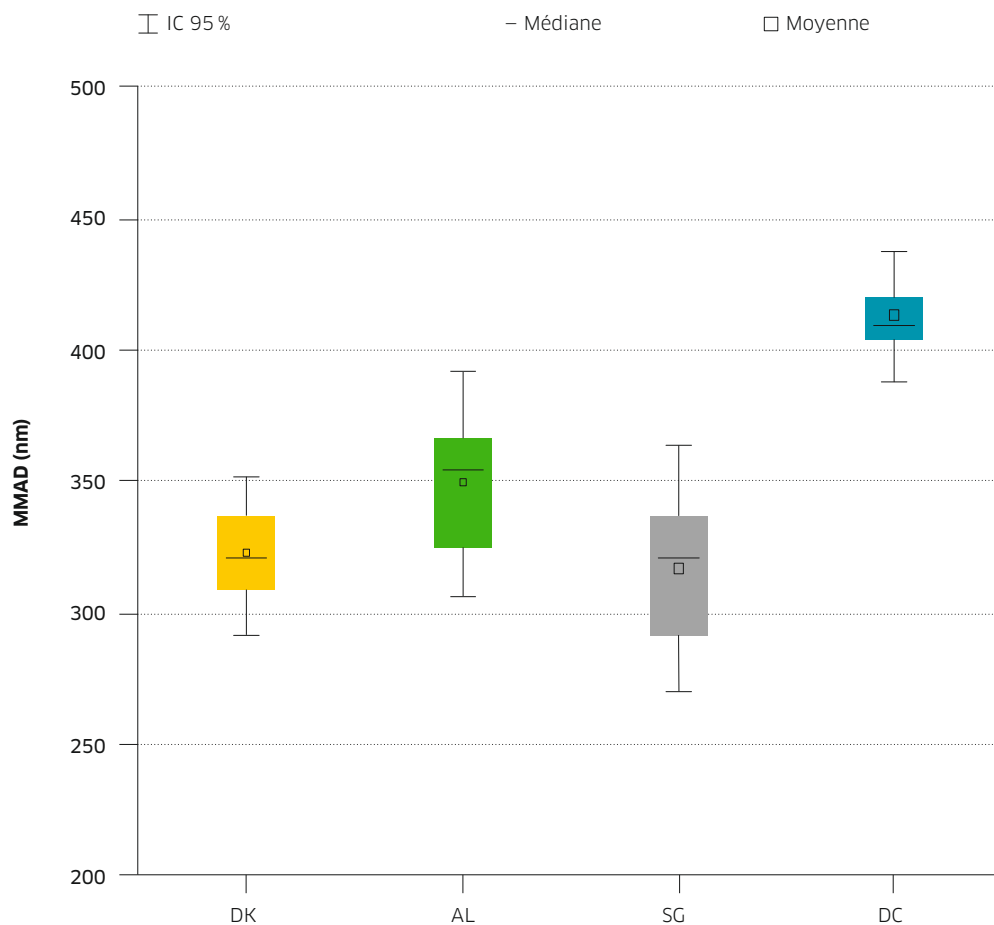
Le graissage des supports est classiquement effectué à l'aide d'une bombe aérosol de graisse. Il s'agit du

mode de graissage recommandé par le constructeur (Dekati) dans le cadre de prélèvements avec impacteurs basse pression (DLPI+, mais également dans le cas de l'ELPI+, dispositif équivalent qui permet des mesures en temps réel). Or, la quantité de graisse déposée sur les supports d'impaction varie en fonction de différents facteurs : la pression appliquée par l'opérateur et la hauteur du spray (distance entre la buse et le support), la quantité contenue dans la bombe aérosol, le temps/la vitesse de passage sur le support devant être graissé...

Pour tenter de s'affranchir de ces limites, un banc de génération automatisé a donc été conçu, afin de déposer différentes graisses étudiées sur le support de collecte. Le principe est basé sur une génération d'un mélange graisse/solvant organique, via un aérographe alimenté en air comprimé.

Ce mode de génération permet de produire un spray de particules fines de graisse de manière reproductible, homogène et contrôlée (en quantité de graisse déposée).

Deux types de graisses, sous forme solide, ont été sélectionnées pour cette étude : une huile de vaseline (Apiezon-L, notée « AL »), et une graisse type silicone (Dow Corning High Vacuum, notée « DC »), généralement utilisée pour le graissage des rodages des évaporateurs rotatifs, possédant une bonne résistance au vide, propriété importante dans le cas des impacteurs à basse pression. L'heptane est le solvant qui a été validé et retenu pour ses propriétés physico-chimiques, en permettant une solubilisation des deux graisses solides, tout en étant suffisamment volatil pour favoriser la stabilité du dépôt de graisse lors des analyses gravimétriques.



← FIGURE 3
Représentation sous forme de « boîtes à moustaches » du MMAD (en nm) en fonction de la nature de la graisse. Le carré central dans chaque « boîte » représente la moyenne des mesures ; le trait noir horizontal, la médiane ; le corps de la « boîte » représente l'intervalle de confiance (IC) à 50% ; et les extrémités des traits verticaux, l'IC à 95%.

Précédemment, Pak *et al.* [9] avaient effectué des essais sur deux graisses : l'Apiezon-L et l'huile de silicone, avec un autre modèle d'impacteur en cascade. Ces auteurs ont préconisé une hauteur de graisse optimale de 9 μm . Cette valeur sert de référence pour les essais menés dans le cadre de cette étude. À titre d'exemple, cette hauteur de graisse correspond à 2,8 mg pour la graisse DC ; et 2,28 mg pour la graisse AL, pour un support de prélèvement de DLPI+ (diamètre 25 mm). Des essais à 20 % et 180 % de cette hauteur de référence (appelée « optimum ») ont également été effectués.

Des essais complémentaires, qui serviront de référence, ont été menés sans ajout de graisse (notés « SG ») et avec un graissage manuel à la bombe aérosol, tel que recommandé par le distributeur du DLPI+ (spray d'Apiezon-L, Dekati), essais notés « DK », où la quantité de graisse déposée reste peu maîtrisée. Les aérosols de PUF ont été générés de manière reproductible, *via* un banc de génération automatisé de fumées de soudage. Les émissions sont d'environ 35 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour ce qui est de la concentration en masse, et de 6.10⁶ particules par cm^3 pour la concentration en nombre.

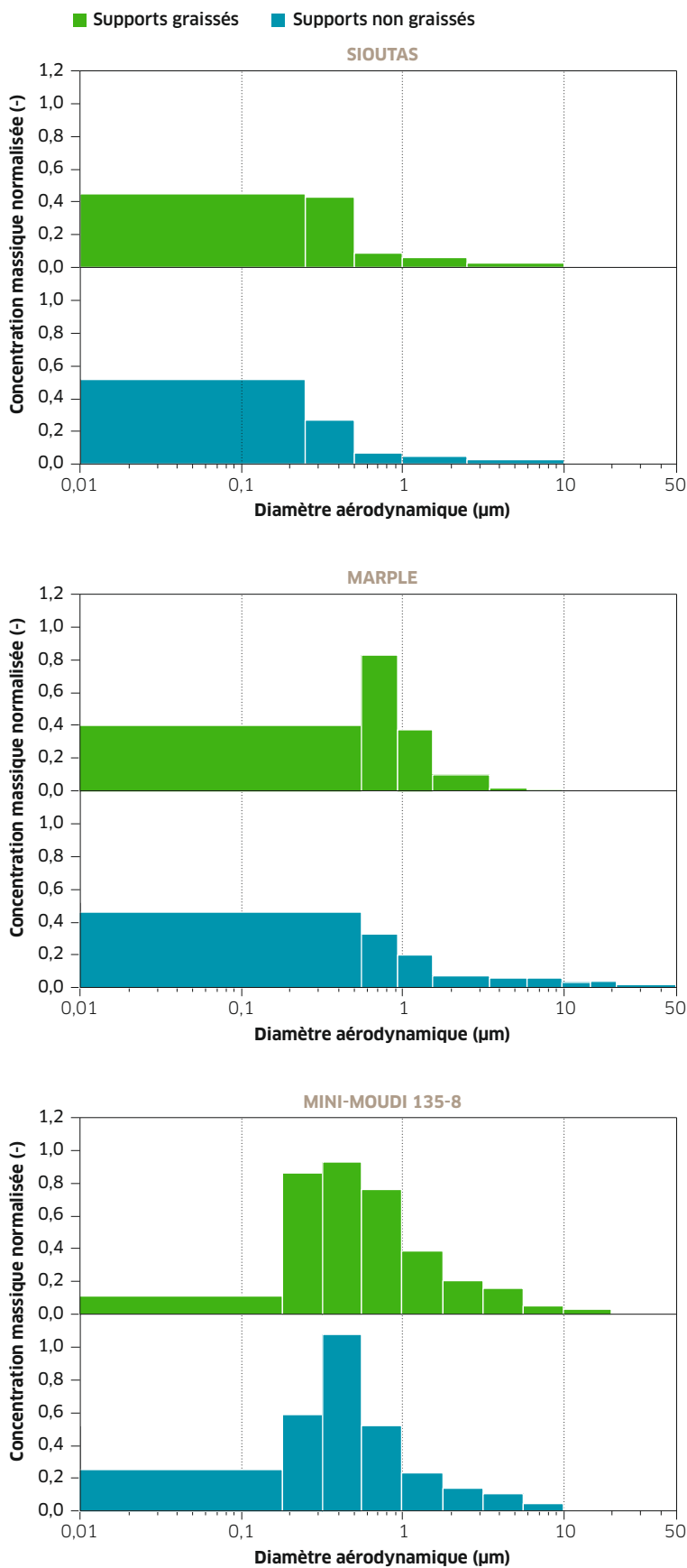
Des premiers essais comparatifs des performances de l'efficacité des différents graissages des supports

du DLPI+ ont été menés pour un temps de prélèvement identique. La Figure 2 synthétise l'ensemble des distributions granulométriques cumulées en masse, obtenues après pesées des supports (avant et après prélèvement) avec différents graissages : deux graisses solides (AL et DC), sans graisse (SG) et graisse de référence commercialisée (DK). Pour les essais AL et DC, les trois charges en graisse sont représentées (charges à 20 %, 100 % et 180 % de l'optimum, notées niveaux « bas, opti et haut », respectivement).

Comme attendu, la distribution granulométrique de l'essai sans graisse (SG) est celle qui présente les diamètres aérodynamiques (D_{ae}) les plus faibles, ce qui témoigne de la présence d'artéfacts (Cf. Encadré 1). Quelle que soit la charge en graisse, les distributions obtenues avec AL et DK sont comparables (pour rappel, il s'agit dans les deux cas d'Apiezon-L, seul le mode de dépôt change).

Les distributions obtenues avec l'huile de silicone (DC) mettent en évidence que, à partir de la charge optimale, cette graisse limite de manière significative les artéfacts, avec pour conséquence une distribution granulométrique présentant des valeurs de D_{ae} plus importantes (d'une centaine de nm, en comparaison avec les autres cas).





↑ FIGURE 4 Histogrammes normalisés des distributions granulométriques obtenues avec et sans graissage des supports de collecte, via des prélèvements sur Sioutas, Marple et Mini-MOUDI 135-8.

La contribution des dépôts sur les parois a été évaluée par analyse chimique après leur essuyage. Ils représentent entre 10 et 20 % de la quantité totale d'aérosols collectés. Ces taux sont conformes à ceux obtenus lors de précédents travaux menés en laboratoire par l'INRS [10] et montrent que le graissage, quel qu'il soit, limite les dépôts sur les parois, mettant en évidence le piégeage des particules par la graisse. Pour une nature de graisse donnée, les résultats de cette étude ont également montré que la valeur du MMAD ne dépend pas de la masse totale de particules générée. Les valeurs de MMAD (*Mass Median Aerodynamic Diameter*) obtenues pour les différentes natures de graisse étudiées sont représentées sous forme de « boîtes à moustaches » sur la Figure 3.

Un décalage de l'ordre de 100 nm des MMAD entre la modalité DC et les autres essais est observé, confirmant ainsi le comportement singulier et particulièrement efficace de cette graisse. Les MMAD de la modalité avec graissage DK (bombe aérosol) sont comparables à ceux de la modalité sans graisse, ce qui témoigne de la faible efficacité de ce type de graissage.

Les conditions optimales de graissage, afin d'éviter les artéfacts, ont donc été définies avec de l'huile de silicone (DC) et une hauteur minimale de dépôt de 9 µm. La hauteur maximale de dépôt n'a pas été précisément définie, mais elle reste liée à une limite physique de la capacité du support à maintenir le dépôt de graisse stable.

L'intérêt du graissage a ensuite été objectivé dans ces conditions optimales, pour les impacteurs en cascade dédiés aux prélèvements individuels. La Figure 4 permet la comparaison des distributions granulométriques, pour des générations équivalentes, pour les trois impacteurs, avec et sans graissage des supports. Quel que soit l'impacteur considéré, l'absence de graissage conduit à un décalage de la granulométrie vers les particules de D_{ae} inférieurs. Cela traduit une réduction significative des phénomènes de rebond et de réentraînement des particules, lorsque les supports sont graissés dans les conditions optimales déterminées dans cette étude.

On peut noter également le comportement remarquable du Mini-MOUDI 135-8 qui, du fait de sa résolution en taille et de son efficacité de collecte, présente un MMAD (et une distribution granulométrique) équivalent à celui obtenu avec l'impacteur de référence, le DLPI+ (400 nm et 440 nm, respectivement).

Autres paramètres étudiés dans les conditions de graissage optimales

La stabilité des échantillons après prélèvement a également été évaluée. En effet, les éventuelles pertes de particules liées aux mouvements des supports de collecte (transport, choc, chute) ont été simulées par le biais de deux tables d'agitation (agitation elliptique

et retournement) pendant 8 heures à température ambiante. Les résultats ne montrent pas de variation significative de masse collectée sur les supports, quels que soient les supports graissés étudiés et la force appliquée (type d'agitation).

Enfin, la stabilité de la graisse a été évaluée lors d'un prélèvement avec le DLPI⁺ sur des supports graissés deux mois et demi avant le prélèvement. La distribution obtenue ne présente pas de différence significative avec un prélèvement sur supports graissés 24 heures avant le prélèvement.

Les préconisations et recommandations issues de ces travaux seront prochainement détaillées dans une fiche MétroPol¹ à destination des préventeurs.

Conclusions

Les résultats de ces travaux démontrent la nécessité de graisser les supports de prélèvement utilisés dans les impacteurs en cascade, notamment dans le cadre de prélèvement de particules ultrafines (PUF) métalliques. La nature et la quantité de la graisse sont également déterminantes, afin d'éviter les effets de rebond et de réentraînement des particules solides. Sur la base de ces résultats expérimentaux, la graisse de silicone a été retenue. Conformément à la littérature [9], la hauteur de dépôt minimale est de 9 µm. Cette préparation des supports devra être compatible avec les analyses chimiques qui pourraient être effectuées ultérieurement, en sus des analyses gravimétriques.

Il convient de choisir le dispositif de prélèvement le plus approprié, en considérant ses avantages et ses limites. Néanmoins, le retour d'expérience suite

à ces travaux laisse présager que deux dispositifs sont d'excellents candidats pour documenter les expositions professionnelles de manière courante et usuelle :

- le Sioutas présente l'avantage de fonctionner à un débit nominal de 9 L.min⁻¹, ce qui en fait un dispositif de choix dans des atmosphères peu empoussiérées, mais présente une résolution limitée (4 étages et un filtre terminal avec D_{ae} = 250 nm, le diamètre de coupure le plus fin) ;
- le Mini-MOUDI 135-8 présente une très bonne résolution (8 étages et un filtre terminal avec D_{ae} = 180 nm, le diamètre de coupure le plus fin) et une facilité d'utilisation (préparation des supports). Le débit de prélèvement associé (2 L.min⁻¹) suppose néanmoins un temps de prélèvement adapté, afin de disposer d'une quantité de matière suffisante. À titre d'exemple de déploiement sur le terrain, des prélèvements effectués avec ce dispositif ont contribué à caractériser les aérosols générés lors de travaux de remplacement de rails dans le tunnel ferroviaire sous la Manche [11].

Les données issues des prélèvements par impacteurs en cascade restent complémentaires à celles obtenues par la métrologie en temps réel, que ce soit pour décrire les situations d'exposition aux PUF métalliques, mais de manière plus large, à l'ensemble des aérosols rencontrés dans l'air des lieux de travail. ●

1. La base de données MétroPol, mise au point par l'INRS, rassemble un grand nombre de méthodes pour réaliser la métrologie des polluants, en particulier sur les lieux de travail. En savoir plus : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol.html>

BIBLIOGRAPHIE

[1] MATERA V., ROUSSET D., BAU S., BEMER D. – Émissions, distributions et analyses chimiques de particules ultrafines issues de divers procédés industriels. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 256, pp. 54-61. Accessible sur : www.hst.fr.

[2] CIPR – Publication n° 66 – *Human respiratory tract model for radiological protection*. Oxford, Pergamon Press, 1994.

[3] SEIPENBUSCH M., YU M., ASBACH C. – Chapter 4 – From source to dose: emission, transport, aerosol dynamics and dose assessment for workplace aerosol exposure. In: *Handbook of nanosafety: measurement, exposure and toxicology*. Amsterdam, Elsevier, 2014.

[4] PATRASCU C., BAU S., CLERC F. ET AL. – Expositions professionnelles lors de la fabrication additive utilisant des poudres métalliques. *Hygiène*

& sécurité du travail, 2021, 263, pp. 45-52. Accessible sur : www.hst.fr.

[5] 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.

[6] TURNER J.R., HERING S.V. – Greased and oiled substrates as bounce-free impaction surfaces. *Journal of aerosol science*, 1987, 18 (2), pp. 215-224.

[7] SCHUMANN T., GYSI H., KAELEN S. – Sixteenth annual Conference of the Gesellschaft für Aerosolforschung. Coating of impaction surfaces of cascade impactors: necessary for sampling ambient aerosols in rural and suburban areas? *Journal of aerosol science*, 1988, 19 (7), pp. 993-996.

[8] SIMON X., WITSCHGER O. – Mesure de l'exposition aux aérosols en fraction

inhalable : avantages et limites de la « cassette fermée ». *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 257, pp. 72-78. Accessible sur : www.hst.fr.

[9] PAK S.S., LIU B.Y.H., RUBOW K.L. – Effect of coating thickness on particle bounce in inertial impactors. *Aerosol science and technology*, 1992, 16, pp. 141-150.

[10] DURAND T., BAU S., MORELE Y., MATERA V. ET AL. – Quantification of low pressure impactor wall deposits during zinc nanoparticle sampling. *Aerosol and airquality research*, 2014, 14 (7), pp. 1812-1821.

[11] BEMER D., OURY B., MATERA V. – Caractérisation des aérosols ultrafins produits lors de travaux de réfection de voies ferrées en tunnel. *Hygiène & sécurité du travail*, 2022, 266, pp. 64-73. Accessible sur : www.hst.fr.