



Dossier

POUDRES ET POUSSIÈRES DANS LES PROCÉDÉS INDUSTRIELS : DES ENJEUX POUR LA PRÉVENTION

❶ Poudres et poussières : un large éventail de procédés et de secteurs d'activité concernés

P. 18

❷ Toxicité des poudres et des poussières

P. 24

❸ Caractérisation des propriétés comportementales des poudres : l'écoulement et la pulvérulence

P. 29

❹ Améliorer les propriétés d'écoulement et limiter l'empoussièremement

P. 37

❺ Découpe de bordures de trottoir à sec et à l'humide : exposition à la silice cristalline

P. 47

❻ Abattage humide : des gouttes pour la prévention de l'exposition aux poussières

P. 52

L'exposition aux poussières représente une problématique de prévention importante, en raison des volumes de poudres manipulées dans l'industrie et des émissions de poussières observées dans la quasi totalité des secteurs industriels. Si de nombreux articles ont été publiés sur la problématique spécifique des nanoparticules et sur les poussières cancérogènes générées par certains procédés (soudage, poussières de bois...), la question plus générale des poussières à effets non spécifiques, issues de la manipulation de poudres dans les procédés ou issues du travail mécanique de matériaux solides, reste encore peu abordée. L'objectif de ce dossier est de faire le point sur cette question de santé au travail, par le biais de quelques exemples pratiques, et sur les moyens de prévention. Ces exemples seront précédés d'un rappel des effets sur la santé des poussières, et des moyens expérimentaux permettant de caractériser les poudres et poussières.

POWDERS AND DUSTS IN INDUSTRIAL PROCESSES: PREVENTION CHALLENGES –
Exposure to dust is a major prevention challenge, because of the quantities of dust handled in industry and the dust emissions occurring in almost all industrial sectors. While numerous articles have been published on the specific matter of nanoparticles and the carcinogenic dusts generated by certain processes (welding, wood dust, etc.), the more general issue of dusts without specific effects, resulting from the handling of powders in processes or from mechanical processing of solid materials, is still hardly addressed. The goal of this dossier is to review this occupational health matter, through a few practical examples, and to go over the prevention measures. These examples will be preceded by a reminder about the health effects of dusts and the experimental means to characterise powders and dusts.

POUDRES ET POUSSIÈRES : UN LARGE ÉVENTAIL DE PROCÉDÉS ET DE SECTEURS D'ACTIVITÉ CONCERNÉS

L'exposition aux poussières est une problématique de prévention, en raison des volumes importants de poudres manipulées dans l'industrie et des émissions de poussières observées dans la quasi totalité des secteurs d'activité. Cet article d'introduction décrit les principales sources d'exposition dans les procédés de fabrication de produits et les procédés mécaniques. Il met en évidence les disparités entre les industries et les TPE, tant concernant les risques d'exposition que les moyens de prévention. La plupart des moyens utilisés pour prévenir les expositions sont basés sur l'aspiration à la source, le confinement et la ventilation. Il s'agit ici aussi d'en faire état, tout en illustrant les connaissances sur les effets des poudres et poussières, leur caractérisation, avec des exemples de moyens de prévention autres que la ventilation.

**JEAN-PIERRE
LECLERC**
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

**VÉRONIQUE
FALK,
MARIA-
GRACIELA
CARES**
Laboratoire
réactions
et génie
des procédés,
LRGP-ENSIC

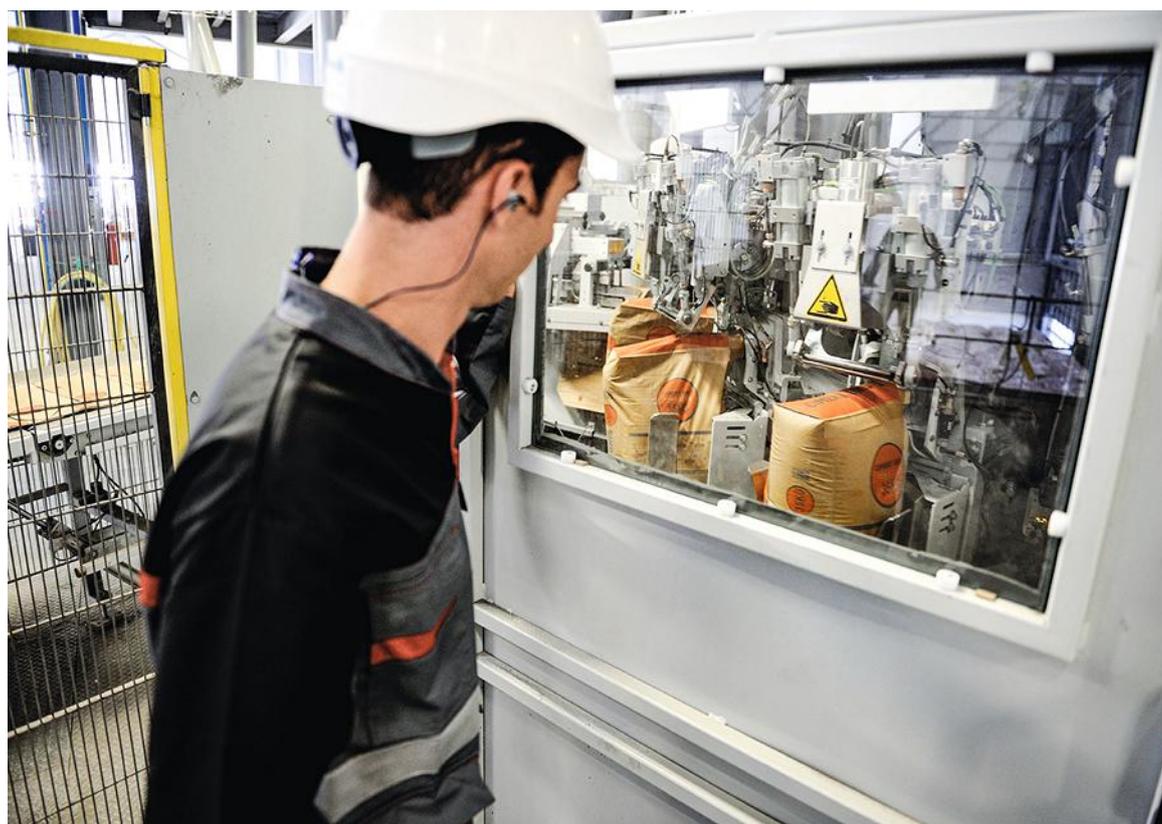
Les matériaux granulaires, ou solides divisés, tels que le sable et le blé, sont omniprésents dans la nature, la vie quotidienne et l'industrie. Après l'eau, ils constituent la deuxième matière la plus manipulée par l'homme, soit la moitié des produits commercialisés dans le monde [1]. Les matériaux granulaires sont très variés, du fait de la diversité de taille et de forme des particules, ou encore de la nature des interactions entre particules. Dans le cadre de ce dossier, parmi les solides divisés, on s'intéressera exclusivement aux poudres. Selon la littérature : « Une poudre est définie comme un ensemble de particules hétérogènes dispersées dans une phase continue gazeuse, entre lesquelles s'exerce une multitude d'interactions telles que les forces de Van der Waals et capillaires » [2]. Selon la norme NF X 11-630 de 2001, une poudre est un ensemble de particules dont les dimensions sont habituellement inférieures à 1 mm [3]. Dans l'industrie, le mot « poudre » désigne les « solides fins divisés », quelle que soit leur forme, très souvent pulvérulents.

L'exposition aux poussières représente une problématique de prévention importante, en raison des volumes considérables de poudres manipulées dans l'industrie. À titre d'illustration, 50 milliards de tonnes de sable et 765 millions de tonnes de blé sont transportés et stockés chaque année dans le monde, et des émissions de

poussières sont observées dans la quasi totalité des secteurs industriels. L'exposition aux nanoparticules a été abondamment traitée dans la littérature, en raison des inquiétudes soulevées dans l'industrie, mais aussi dans la société civile¹. Si la reconnaissance comme cancérigènes des poussières de bois, d'amiante ou de silice ne fait plus débat, l'exposition professionnelle aux poussières avec d'autres effets sur la santé ou dites sans effet spécifique, y compris sur le long terme, est moins abordée. Cependant, les limites de concentrations moyennes en poussières totales et alvéolaires dans les locaux à pollution spécifique ont été récemment abaissées, preuve de l'inquiétude des autorités quant aux risques liés à ces expositions?. Il est difficile d'estimer précisément le nombre de travailleurs exposés, tant les secteurs concernés sont nombreux. L'objectif de cet article est de présenter une vue d'ensemble des problématiques d'exposition aux poussières issues des procédés de fabrication de produits et des procédés mécaniques. Les systèmes de protection collective, disponibles et efficaces, seront rapidement décrits.

Une problématique qui touche tous les secteurs de l'industrie

L'exposition des travailleurs aux poussières est présente dans presque tous les secteurs d'activité professionnelle. Elle est source de maladies professionnelles. Certaines poussières sont des



© Gaël Kerbaol / INRS / 2013

cancérogènes avérés (amiante, silice, poussières de bois), ou à l'origine de maladies respiratoires ou d'allergies. Les poussières peuvent être issues de la manipulation directe de poudre, d'opérations de traitement ou de manipulation de matières métalliques, minérales ou organiques (végétales ou animales).

Compte tenu de la multitude des secteurs d'activité touchés par l'émission de poussières, les émissions directement liées aux procédés sont ici privilégiées. Deux types de sources d'émission sont distingués : les procédés mettant en œuvre des poudres qui, au cours de leur manipulation, émettent des poussières ; et les procédés mécaniques qui, à partir d'un matériau solide, émettent des poussières. Les émissions de poussières dans l'agriculture et l'élevage (qui représentent un tiers des émissions totales de poussières) ne sont pas traitées ; elles sont sources de nombreuses affections respiratoires et une analyse de la base Colchic sur les expositions aux poussières entre 2014 et 2018 montre que c'est dans le domaine de l'abattage des volailles que sont observés les plus hauts taux d'exposition aux poussières parmi plus de 25 secteurs d'activité [4]. L'industrie du bois sous toutes ses formes emploie des centaines de milliers de travailleurs exposés aux poussières de bois, qui sont un cancérogène avéré. Enfin, les opérations de soudage ou de fabrication 3D, déjà présentées dans des articles précédents³, sont

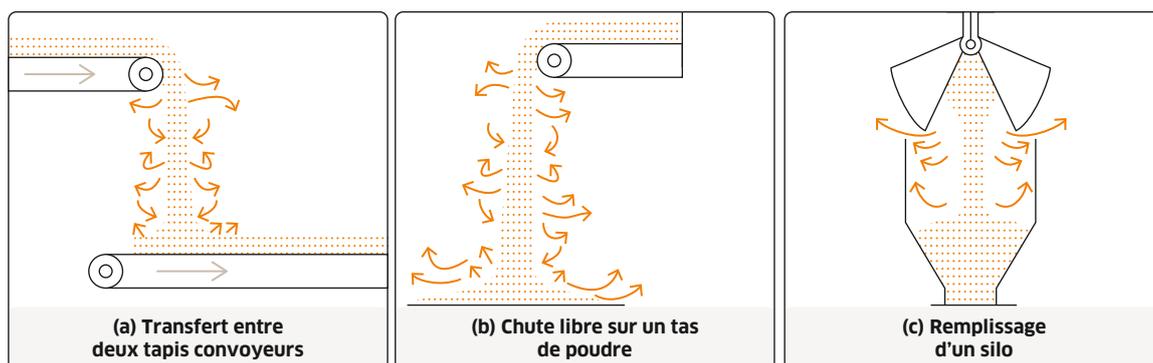
abordées de façon plus succincte, bien qu'elles relèvent d'émissions issues de procédés.

Procédés faisant intervenir la manipulation de poudres

La manipulation de poudres concerne la quasi totalité des secteurs industriels : plâtres et ciments, agroalimentaire, cosmétique, sidérurgie, peintures, chimie de base, pharmacie, où sont différenciées l'exposition des travailleurs dans les unités de fabrication, avec la manipulation de grandes quantités de matériaux, et l'exposition des utilisateurs de ces matériaux. Par exemple, les industries des plâtres et ciments, qui fabriquent les produits et assurent leur conditionnement, et les entreprises du bâtiment qui utilisent les produits neufs lors des constructions ou réhabilitations. Autre exemple, les industries agroalimentaires, où sont manipulées, de façon automatisée, de grandes quantités de poudres, soit directement pour les conditionner (farine par exemple), ou pour réaliser des mélanges destinés à la fabrication de pains ou de gâteaux ; et les boulangeries-pâtisseries, où sont travaillés manuellement les farines ou mélanges de farines. Si la nature des poudres utilisées et les granulométries sont très différentes d'un secteur à l'autre, les opérations unitaires mises en œuvre sont identiques ou très proches. Ces différentes opérations unitaires sont la fragmentation et l'agglomération, la classification et le mélange, le transport et



FIGURE 1 →
Exemples
de procédés
générant
des émissions
importantes
de poussières
(d'après [5]).



le stockage. On peut identifier une grande variété de mécanismes favorisant la mise en suspension des poussières dans les lieux de travail et plusieurs situations sont plus particulièrement émissives (Cf. Figure 1) :

- le transfert de poudres d'un tapis convoyeur à un autre ;
- le déversement de poudres ;
- le remplissage d'un silo de stockage, d'un sac ou d'une boîte.

Cette liste peut être complétée par de nombreuses autres situations : ré-entraînement aéroporté mécanique de poudres précédemment renversées ou déposées (lors de procédures de nettoyage à sec, par exemple), renversement accidentel de poudres, opérations unitaires de procédés tels que le broyage et la micronisation [5].

Ces opérations sont rarement optimisées pour limiter l'exposition à la source. En revanche, les installations concernées sont généralement munies de systèmes de protection collective, basés sur des systèmes d'aspiration au plus près des émissions de poussières. Si les grands groupes industriels sont en général équipés de tels dispositifs, il n'en est pas de même des PME/TPE, en raison de leur coût élevé. Une problématique commune à l'ensemble de ces secteurs industriels est l'écoulement qui intervient dans les étapes de remplissage, de vidange, de transport, de dosage, de mélangeage ou encore de conditionnement des produits. L'ensemble de ces opérations unitaires et les différents systèmes existants sont décrits en détail dans une formation dispensée par le Cnam [6].

Outre l'émission de poussières, ces opérations unitaires, simples en apparence, posent de nombreux problèmes quotidiens aux industriels concernés, qui peuvent conduire, lors de leur résolution, à l'apparition de nouveaux risques professionnels. Le blocage de trémies ou de conduites, un mauvais remplissage de récipients ou de réacteurs, le colmatage d'éléments de tuyauterie (vannes, écluses, tuyaux...) ou l'irrégularité des débits d'alimentation des chaînes de production entraînent des pertes de production, mais surtout, génèrent des situations à risque pour

les opérateurs confrontés à ces dysfonctionnements. Cela nécessite parfois l'intervention manuelle à l'intérieur des silos ou trémies de stockage pour retirer un produit motté ou rétablir un écoulement, avec des risques générés par la mise en contact du personnel avec les produits (inhalation, contact cutané), voire des risques d'ensevelissement lorsque l'écoulement se rétablit brusquement. Par ailleurs, l'utilisation d'un marteau ou d'une masse pour frapper un silo et faire sortir le solide stocké conduit à la dégradation des installations et donc, à l'aggravation des risques. D'une façon générale, les interventions manuelles sont des sources potentielles de mise en suspension des poudres et des poussières avec des risques d'inhalation, d'explosion et de dépôt de matière sur les surfaces de travail, sources de contacts cutanés.

S'il existe des systèmes de protection collective couramment utilisés dans l'industrie, il peut être difficile pour les utilisateurs individuels (artisans) ou les TPE de mettre en œuvre une prévention collective, notamment dans le cas de travail délocalisé sur des chantiers pour les plâtres et ciments, par exemple.

Dans l'industrie agroalimentaire, il existe des risques d'exposition importante à la farine, mais aussi d'explosion, limités par le capotage des systèmes de transport et de mélange, l'aspiration à la source pour les opérations de transvasement. De tels systèmes sont rarement déployés chez les artisans boulangers en raison des coûts engendrés.

Dans la quasi totalité des secteurs, les poudres arrivent en vrac ou dans des sacs dans les usines, où elles sont stockées avant d'être transportées vers les autres opérations unitaires. D'une façon générale, le meilleur moyen de prévenir les risques d'exposition consiste à confiner les poudres tout au long de la chaîne d'opérations unitaires.

La perception et la gestion des risques sont cependant très variables d'un secteur d'activité à un autre. Les acteurs de la prévention constatent de nombreuses absences de protections sur les chantiers, dans les industries de matériaux pour la construction et le BTP, dont les acteurs sont variés, et les travailleurs exposés quotidiennement à de nombreuses substances dangereuses (poussières de silice

et de métaux, amiante, sciure de bois, peinture en poudre...). Dans l'agroalimentaire, la manipulation de poudres ne procure pas toujours un sentiment d'insécurité, même si les boulangers sont bien informés des risques liés à la farine. En ce qui concerne l'industrie pharmaceutique, les conditions d'hygiène très strictes font que le confinement est respecté jusqu'au conditionnement.

Procédés mécaniques émettant des poudres et des poussières à partir d'un matériau solide

La deuxième source d'émission de poussières concerne les procédés mécaniques de traitement et de modification de matériaux solides. Il s'agit principalement d'opérations de broyage, de ponçage, de découpe, de perçage et de polissage de matériaux métalliques et minéraux. La problématique des poussières de bois, qui a été traitée de nombreuses fois dans la littérature, n'est pas abordée dans ce dossier, mais on retrouve dans ce secteur d'activité des opérations de découpe, perçage, ponçage, qui ne peuvent être réalisées à l'humide.

Pour le travail de la pierre ou des matériaux de construction, le risque le plus prégnant est celui de l'exposition à la silice cristalline, mais l'exposition à des concentrations élevées aux autres poussières est aussi très importante. Pour le travail des métaux, les risques concernent surtout l'exposition aux béryllium, cadmium, chrome, cobalt, mercure, nickel et plomb, et dans une moindre mesure aux cuivre, aluminium et zinc (Cf. Photos 1 et 2).

Généralement, les quantités de poussières émises lors des opérations mécaniques sur les métaux sont relativement faibles, comparées à celles émises lors du traitement des matériaux minéraux.

De nombreux moyens de prévention permettent de limiter les expositions. Quel que soit le procédé mécanique utilisé, la règle est de capter le maximum de poussières à la source de l'émission. Pour les travaux sur des matériaux métalliques, qui nécessitent souvent une grande précision de travail, la présence d'un système d'aspiration suffisant près de la source d'émission n'est pas toujours facile à mettre en œuvre. Pour le travail des matériaux minéraux, il est souvent nécessaire de prévoir des installations avec des débits d'aspiration très élevés.

Par ailleurs, lors de travaux en intérieur, il est possible d'équiper les locaux de cabines et de systèmes d'aspiration adaptés. Sur les chantiers mobiles, cela est beaucoup plus délicat.

Lorsque cela est possible, il est préférable d'utiliser des outils à main moins émissifs (carrellette, scie, cisaille, ciseaux à bois...), mais cela ne couvre qu'une très faible partie des activités. Par ailleurs, afin d'éviter des coupes sur les chantiers, il est préférable d'anticiper, en les préparant en atelier, dans un environnement davantage protégé.

TYPE DE POUDRE	PRODUCTION (TONNES)	
	FRANCE	%
Cuivre (2021)	7,17 x 10 ³	< 0,1 %
Mica (2021)	1,90 x 10 ⁴	< 0,1 %
Polymères (2021)*	3,99 x 10 ⁵	1 %
Lait (2021)	5,31 x 10 ⁵	1 %
Amidon (2020)	2,78 x 10 ⁶	7 %
Farine de blé (2020)	3,83 x 10 ⁶	10 %
Sucre (2017)	4,94 x 10 ⁶	12 %
Sable (2021)	1,10 x 10 ⁷	27 %
Ciment (2019)	1,67 x 10 ⁷	42 %
Total	4,02 x 10 ⁷	100 %

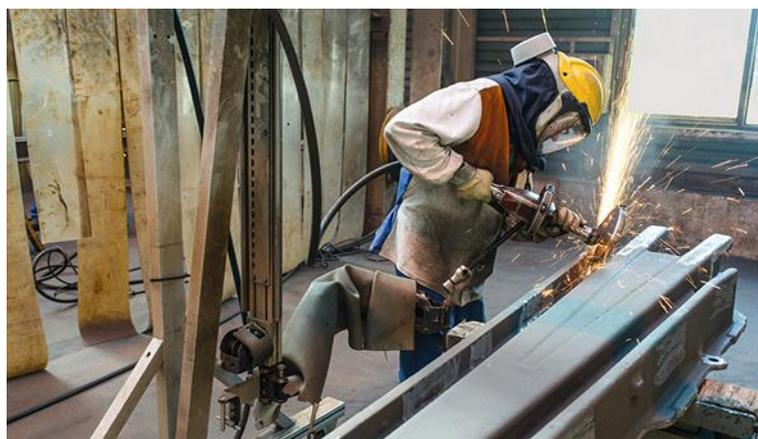
Des quantités imposantes de poudres, des situations exposantes et un nombre élevé de travailleurs exposés

Le Tableau 1 apporte un certain nombre de données sur la production de différents types de poudres et sur leurs proportions relatives. Sans surprise, les poudres utilisées en génie civil représentent la plus importante propor-

↑ **TABLEAU 1**
Exemples de quantité de poudres produites annuellement en France (Données issues du site <https://fr.statista.com>, *communication personnelle).



↑ PHOTO 1 Découpe de pierre.



↑ PHOTO 2 Découpe de métaux.



© Gael Kerbaol/INRS/2021

↑ PHOTO 3
Captage des
poussières
à l'aide
d'anneaux
de Pouyès
lors du transfert
de produit
pulvérulent.

tion, suivies par celles utilisées dans l'industrie agroalimentaire.

En ce qui concerne les poussières générées par des procédés, environ 36 500 travailleurs, principalement dans les domaines de la construction et du BTP, sont exposés à la silice cristalline, dont 23 000 à 30 000 d'après l'Anses à des valeurs supérieures à la VLEP de $0,1 \text{ mg/m}^3$. Il s'agit principalement d'expositions liées à des travaux de découpe, de ponçage ou de démolition. À titre d'illustration des quantités de poussières émises, 1 heure de rainurage peut générer 17 kg de poussière ; 3 kg dans le cas du ponçage, 2 kg dans celui du burinage [5].

Les disparités entre les industries et les TPE concernant les risques d'expositions et les moyens de prévention sont notables. Une étude, conduite en 2007 en région Rhône-Alpes par deux services de prévention et de santé au travail en lien avec la Carsat sur l'exposition aux poussières de farine chez les boulangers, a mis en évidence trois phases de travail qui les exposent de façon importante : le remplissage du pétrin et le fleurage (dépôt d'une fine couche de farine sur une surface pour empêcher l'adhésion), qui sont des phases d'écoulement de la farine, et le nettoyage. Si l'on compare avec l'industrie agroalimentaire, les expositions durant les phases de remplissage peuvent être limitées par le capotage et, éventuellement, par l'aspiration à la source. Les grandes entreprises agroalimentaires en sont équipées, mais pas nécessairement les boulangeries. Le fleurage est une opération qui n'est pas rencontrée dans l'industrie et c'est davantage sur la lenteur des gestes qu'il est possible d'agir pour limiter l'émission de poussière. Enfin, pour le nettoyage,

les industries sont équipées d'aspirateurs hautes performances, ce qui est loin d'être le cas dans les boulangeries.

Les activités liées aux procédés mécaniques suivants, qu'elles soient menées au sein même d'une entreprise ou sur les chantiers mobiles, conduisent aussi à des disparités d'exposition et de prévention. Les opérations de métallurgie et d'usinage de pièces mécaniques produisent des particules métalliques, par exemple lors du polissage, du lustrage ou du nettoyage des pièces métalliques. Il est souvent difficile de collecter les petites particules de métal projetées à grande vitesse. Ces poussières métalliques sont très nocives pour la santé. Ici encore, il est possible de les aspirer à la source dans les industries qui peuvent être équipées ; mais sur les chantiers en extérieur, les expositions sont les plus importantes, car l'aspiration à la source des émissions est plus difficile à mettre en œuvre et le port des équipements de protection individuelle (EPI) n'est pas toujours respecté.

Des moyens de prévention existants, mais pas toujours mis en œuvre

Il est tout d'abord à noter que, dans le domaine de la protection contre les poussières, la réduction à la source des émissions est assez peu mise en œuvre, que ce soit au niveau des machines utilisées dans les procédés mécaniques ou des procédés mettant en œuvre le traitement des poudres, comme le broyage, qui reste très émissif. Le captage à la source et le confinement des machines sont les mesures de prévention généralement privilégiées. De nombreux moyens de captage-ventilation existent et sont adaptés à différents secteurs. Un dossier paru dans *Travail & sécurité* en 2019 en présente plusieurs exemples [7]. Le *Guide pratique de ventilation* de l'INRS ED 6441 [8] décrit en détail la quasi totalité des systèmes de prévention pour la manipulation des poudres. Un grand nombre de procédés industriels nécessitant la mise en œuvre d'opérations unitaires qui impliquent des matériaux pulvérulents sont désormais équipés de systèmes de protection collective, généralement de plus en plus efficaces. Pour les utilisateurs dans les PME-TPE, en raison de la délocalisation des chantiers, de la multiplication des tâches pour un même opérateur et du manque de moyens, le recours à ces dispositifs est moins évident.

Par exemple, les anneaux de Pouyès (Cf. Photo 3) sont indispensables lors du chargement de cuves, de réacteurs ou de trémies, pour limiter les émissions grâce à la dépression extérieure qui est créée. Ici encore, les sites industriels sont de plus en plus équipés de ce système, ce qui n'est pas toujours le cas dans les TPE, comme les boulangeries ou sur les chantiers de BTP. Le transport par aspiration permet de créer une dépression à l'intérieur du cir-

cuit, ce qui évite la diffusion des poussières vers l'extérieur. Si le carénage des machines permet de réduire l'exposition aux poussières, il tend aussi à réduire les accès pour le contrôle et la maintenance. Ces aspects doivent être intégrés dans la réflexion avant la mise en place des équipements de protection.

Dans les secteurs utilisant les procédés mécaniques, le « travail à l'humide », trop peu utilisé, permet de réduire très fortement les expositions sur les opérations unitaires comme la découpe, le ponçage, le sciage, le rainurage... ou, à une plus grande échelle, la démolition. Cependant, il n'est pas toujours facile d'utilisation sur les chantiers mobiles et son efficacité n'est pas optimale. L'amélioration des connaissances dans ce domaine est une préoccupation de l'INRS, qui conduit des travaux d'études sur le sujet.

L'autre risque important, lors de la génération de poussières combustibles, est le risque d'explosion. Il est donc essentiel de limiter l'empoussièrement et de disposer de dépoussiéreurs afin de traiter l'air des locaux, ce qui, par la même occasion, limite aussi l'exposition des travailleurs.

Enfin, dans de nombreuses situations, les systèmes de prévention collective ne permettent pas de s'affranchir du port d'EPI [9].

Synthèse

De nombreux travailleurs sont exposés aux poudres ; même lorsqu'il s'agit de poussière à effets réputés non spécifiques, la répétition de ces expositions est susceptible de nuire à la santé des travailleurs. Ce dossier ne se limite donc pas à l'exposition lors de la mise en œuvre de procédés chimiques ou de l'utilisation de procédés mécaniques ; il propose un tour d'horizon des situations rencontrées dans de nombreux secteurs et des moyens de prévenir les risques associés. Il n'inclut pas, en dépit de leur importance, les expositions dans les secteurs agricole, de l'élevage et de l'industrie du bois, qui ont déjà été abondamment traités dans la littérature. Le deuxième article de ce dossier (Cf. pp. 24-28) rappelle les risques encourus par les travailleurs qui sont exposés aux poussières. Le troisième article (Cf. pp. 29-36) décrit les moyens analytiques permettant de caractériser les poudres et en particulier leur pulvéulence, ces caractérisations étant indispensables pour déployer des moyens de prévention adaptés.

Les trois derniers articles suivants abordent ensuite des cas d'étude illustrant les moyens de prévention qui peuvent être mis en place :

- le quatrième (Cf. pp. 37-46) concerne les procédés faisant intervenir la manipulation de poudres et montre qu'il est possible de réduire l'empoussièrement sans pénaliser le fonctionnement des procédés, et en particulier le bon écoulement des

poudres. Cette solution est applicable à de nombreux domaines (plâtres et ciments, agroalimentaire, pharmacie, cosmétiques...);

- le cinquième (Cf. pp. 47-51) présente des mesures d'exposition réalisées en situation réelle de travail lors de la découpe de bordures de trottoir. Il montre, en particulier, l'intérêt du travail à l'humide, qui permet de fortement limiter à la source l'émission de poussières ;
- le sixième sujet (Cf. pp. 52-58) illustre les limites et utilisations de l'abattage humide, qui consiste à projeter des gouttelettes d'eau sur des poussières en suspension ou des aérosols afin de les capter. Des règles simples sont proposées pour en améliorer l'efficacité, que ce soit en intérieur pour les procédés mettant en œuvre des poudres, ou en extérieur, lors de l'utilisation de procédés mécaniques. ●

1. Voir notamment les publications de l'INRS et de la revue sur les nanomatériaux : <https://www.inrs.fr/risques/nanomateriaux/ce-qu-il-faut-retenir.html> et : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2026>

2. Voir le décret n° 2021-1763 du 24 novembre 2021 modifiant le Code du travail (article R. 4222-10). Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr. Voir aussi l'article suivant pp. 24-28.

3. Voir notamment sur les technologies d'impression 3D : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TR%2060> et : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%2029>

BIBLIOGRAPHIE

[1] BATES L. – *The need for broad education in bulk technology*. Accessible sur : <https://forum.bulk-online.com/showthread.php?27607-Lyn-Bates-The-Need-for-Broad-Education-in-Bulk-Technology>

[2] SCHER J. – *Rhéologie, texture et texturation des produits alimentaires*. Techniques de l'ingénieur, 2006, p. 21.

[3] SALEH K., GUIGON P. – *Caractérisation et analyse des poudres : propriétés comportementales des solides divisés*. Techniques de l'ingénieur / Génie des procédés, 2009, n° J2252.

[4] SAUVE J.F., MATER G. – *Portrait des expositions aux poussières inhalables et alvéolaires mesurées entre 2014 et 2018*. *Hygiène & sécurité du travail*, 2020, 258, BD 6, pp. 74-79. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=BD%206>

[5] ANSART R. – *Émission de poussières lors de la manipulation de poudre : interaction entre les particules en mouvement et l'air ambiant*. Thèse de l'INP-Toulouse, 2007.

[6] DEBACQ M. – *Opération sur les solides pulvérulents*. In : Cours de licence CGP109 « Génie des procédés : Opérations unitaires fondamentales ». Cnam, 2020. Accessible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-02284551v2>

[7] LARROQUE D. ET AL. – *L'aspiration en complément de la substitution*. In : Dossier - Le captage des poussières. *Travail & sécurité*, juillet-août 2019, 807, pp. 20-21. Accessible sur : www.travail-et-securite.fr

[8] INRS – *Mise en œuvre de matériaux pulvérulents*. ED 6441, coll. Guide pratique de ventilation, 2021. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206441>

[9] INRS – *Équipements de protection individuelle (EPI). Règles d'utilisation*. ED 6077. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206077>

TOXICITÉ DES POUDRES ET DES POUSSIÈRES

Les poudres et poussières présentent une grande diversité selon le secteur d'activité d'où elles proviennent (bâtiment et travaux publics, métallurgie, agroalimentaire, beauté et esthétique, transport...). Cet article dresse un panorama succinct de leur toxicité, hors particules ultrafines et nanomatériaux. Plusieurs facteurs influencent la pénétration et le devenir des particules dans l'organisme (caractéristiques de la particule, niveau d'empoussièrement, antécédents de la personne exposée, etc.), ce qui est à l'origine d'une diversité de profils toxicologiques. Si les poussières dites sans effet spécifique ne présentent pas d'effet autre que ceux résultant des conséquences d'une surcharge pulmonaire (carbonate de calcium, silice amorphe, alumine, acier au carbone, polyéthylène...), d'autres sont connues pour causer des pathologies particulières (cancers, sensibilisation et allergies : silice cristalline, farine, bois...). Quel que soit le type de particules, la priorité doit rester la prévention primaire, pour limiter l'exposition des travailleurs.

LAURELINE
COATES
INRS,
département
Études et
assistances
médicales

Les poudres et poussières sont présentes dans de nombreux secteurs d'activité (bâtiment et travaux publics, métallurgie, agroalimentaire, beauté et esthétique, transport...) où, du fait de leur grande diversité (nature chimique, taille, forme...), elles peuvent être à l'origine d'effets variés sur la santé des travailleurs. Cet article traite, en première partie, de la pénétration des particules dans l'organisme et de leur devenir. La deuxième partie est consacrée aux poussières considérées comme étant sans effet spécifique ou à faible toxicité (carbonate de calcium, silice amorphe, alumine, acier au carbone, polyéthylène...), et la troisième aux poussières connues pour causer des pathologies particulières (silice cristalline, farine, bois, plomb...).

Pénétration des particules dans l'organisme

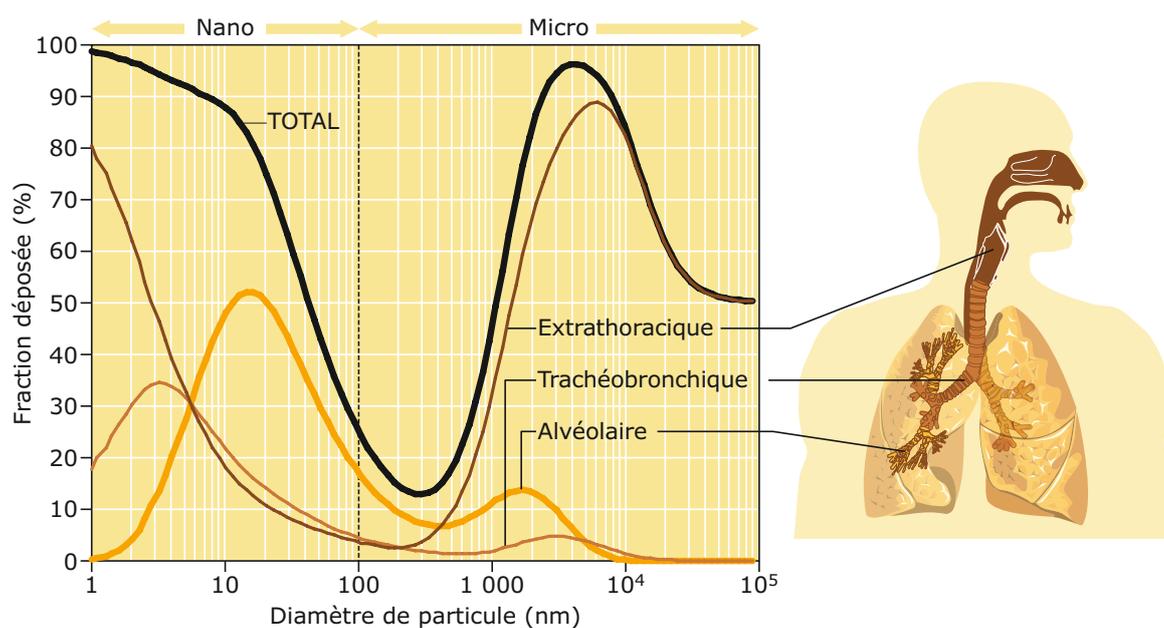
Dépôt des particules dans l'arbre respiratoire

L'inhalation est la principale voie d'exposition aux poussières en milieu professionnel. Les particules en suspension dans l'air vont en effet pouvoir être inhalées, puis se déposer le long des voies respiratoires depuis les fosses nasales et la bouche, jusqu'à l'extrémité de l'arbre respiratoire, où se réalisent les échanges gazeux, à savoir les alvéoles pulmonaires.

Le dépôt des particules dans l'arbre respiratoire dépend de différents facteurs liés aux particules en suspension (propriétés physicochimiques comme la taille, la forme). Différents mécanismes de dépo-

sition sont décrits : l'impaction inertielle (typiquement pour les particules de plus de 5 µm, lorsque celles-ci atteignent une courbe dans les voies respiratoires et que la vitesse d'écoulement d'air est élevée), la sédimentation (dépôt de particules sous l'effet de la pesanteur), l'interception (le contact d'une partie de la particule avec la paroi des voies aériennes entraîne son dépôt), la diffusion (mouvement brownien propre aux particules de moins de 1 µm), les forces électrostatiques (dépôt de la particule selon sa charge).

Des modèles théoriques permettent de prédire la probabilité de dépôt des particules inhalées en fonction de leur taille (Cf. Figure 1). Globalement, les particules dont le diamètre aérodynamique (diamètre fictif d'une sphère qui aurait le même comportement physique) est supérieur à 10 µm resteront au niveau de la région extrathoracique ; alors que les particules de plus petite taille (entre 5 et 10 µm) pourront pénétrer facilement dans les fosses nasales ou la bouche selon le mode de ventilation, et se déposer dans la région trachéo-bronchique. Les particules encore plus petites (inférieures à 5 µm) seront quant à elles les plus susceptibles d'atteindre les alvéoles pulmonaires. En pratique, il est exceptionnel en milieu professionnel qu'un aérosol présente un profil monodispersé. Au-delà des facteurs liés aux particules, le dépôt pulmonaire des particules dépend aussi de facteurs liés à l'individu et à l'exposition (ventilation nasale ou buccale, activité physique, etc.).



← FIGURE 1 Probabilité de dépôt des particules inhalées (en pourcentage) dans les différentes régions de l'arbre respiratoire en fonction de leur diamètre, en nanomètres (modèle de la Commission internationale de protection radiobiologique [2]).

Épuration ou « clairance » pulmonaire des particules

Une fois que les particules sont déposées au niveau de l'arbre respiratoire, différents mécanismes physiologiques vont permettre leur épuration plus ou moins rapide et plus ou moins efficace des régions trachéobronchiques et alvéolaires [1].

- **La clairance mucociliaire** : l'arbre respiratoire (à l'exclusion des alvéoles) est tapissé d'un mucus piégeant les particules inhalées. Ce mucus est transporté jusqu'au carrefour aérodigestif grâce au battement continu de cellules ciliées, permettant une épuration mécanique rapide des particules déposées au niveau trachéobronchique. On parle d'« ascenseur ou d'escalator mucociliaire ». Les particules déposées au niveau extrathoracique peuvent également être dégluties.
- **La « clairance alvéolaire »** correspond à trois mécanismes cellulaires et tissulaires associés :
 - **la phagocytose** : certains types de cellules pulmonaires dédiées à la défense de l'organisme (macrophages alvéolaires, polynucléaires neutrophiles) mettent en œuvre un processus cellulaire destiné à la captation et la dégradation de particules : la phagocytose. Lorsque les particules déposées sont des fibres trop longues pour être internalisées en totalité par les macrophages, la phagocytose ne peut être menée à terme, on parle alors de « phagocytose frustrée ». Ce phénomène, décrit notamment pour les fibres longues et fines d'amiante, induit le relargage d'espèces réactives de l'oxygène, au potentiel génotoxique et mutagène ;
 - **la translocation** : dans le poumon profond, les particules accumulées dans l'interstitium pourront être épurées lentement *via* la circulation

lymphatique et, potentiellement, pénétrer dans les capillaires pour être distribuées vers d'autres organes et tissus ;

- **l'internalisation** : les particules peuvent également être internalisées dans l'interstitium ou tissu conjonctif pulmonaire par différents mécanismes actifs et passifs.
- Plusieurs facteurs liés aux particules et aux personnes exposées sont susceptibles de modifier ces phénomènes d'épuration pulmonaire : taille des particules, quantité déposée, âge des individus, antécédents respiratoires, co-expositions professionnelles et extraprofessionnelles, etc.

Autres voies de pénétration des particules dans l'organisme

D'autres voies d'exposition aux particules sont possibles en milieu professionnel :

- **l'exposition par voie cutanée** se produit par contact direct. La pénétration cutanée des particules micrométriques reste généralement limitée sur une peau saine [2]. Mais plusieurs facteurs relevant des particules (taille, propriétés de surface, charge...) ou de la peau (présence de lésion cutanée, sueur, pores...) peuvent modifier la pénétration percutanée des particules ;
- **l'exposition par voie digestive** se produit en portant à la bouche des mains contaminées par des particules, ou lors de la clairance des particules inhalées par déglutition. Les substances étrangères qui traversent la muqueuse gastro-intestinale pénètrent dans le flux sanguin. La quantité de particules qui traversent la muqueuse dépend du site d'entrée (l'intestin grêle étant le site d'absorption le plus important) et de plusieurs facteurs propres à l'individu (flore intestinale, enzymes,



état nutritionnel...) et au toxique (propriétés physicochimiques, granulométrie, solubilité... [3]). Seule l'étude des conditions de travail permet d'apprécier l'importance de chaque voie d'exposition dans une situation de travail donnée.

Devenir des particules dans l'organisme

Les particules déposées peuvent avoir une action locale et/ou à distance selon leurs caractéristiques physicochimiques et entraîner diverses pathologies résultant de différents mécanismes toxiques : irritation, surcharge pulmonaire, sensibilisation, cancérogénicité...

La taille des particules ne permet pas de prédire à elle seule leur devenir dans l'organisme. D'autres caractéristiques, comme leur solubilité, jouent un rôle important. Le dépôt et la clairance des particules déterminent leur rétention dans l'organisme (ou biopersistance). Plus la rétention des particules est longue, plus la probabilité de survenue d'effets à long terme risque d'être augmentée.

Dans l'état actuel des connaissances, on distingue les poussières dites sans effet spécifique (PSES), qui ne peuvent provoquer que des surcharges pulmonaires (exemples : carbonate de calcium, silice amorphe, alumine, acier au carbone, polyéthylène...), des poussières qui entraînent des pathologies spécifiques (silice cristalline, bois, farine, plomb...).

En France, il existe plusieurs tableaux de maladies professionnelles impliquant l'exposition à des par-

ticules (poussières ou vapeurs arsenicales, poussières d'amiante, poussières de bois, poussières de cobalt associées au tungstène avant frittage, poussières textiles végétales, poussières minérales renfermant de la silice cristalline, des silicates cristallins, du graphite ou de la houille, etc.) [4].

Toxicité des poussières considérées comme « sans effet spécifique »

Les PSES sont définies comme des poussières qui – en l'état actuel des connaissances – ne présentent pas d'effet autre que ceux résultant des conséquences d'une surcharge pulmonaire. Cette appellation est donnée à défaut d'avoir pu démontrer que ces poussières présentent un effet spécifique. Cela n'exclut pas la possibilité qu'une poussière de ce type ait des effets plus marqués qu'une autre (exemple : effets respiratoires survenant à des niveaux d'exposition plus faibles) [1].

Les PSES sont insolubles ou très faiblement solubles dans l'eau ou les fluides biologiques (comme le mucus pulmonaire) ; elles ont une forme particulaire (et non pas fibreuse), elles ne présentent pas d'activité de surface ; elles ne sont ni cytotoxiques (toxiques pour les cellules), ni génotoxiques (toxiques pour le matériel génétique), ni radioactives, ni immunogènes (capables d'induire une réaction immunitaire), ni réactives chimiquement dans le tissu pulmonaire. En revanche, elles sont susceptibles d'exercer une génotoxicité indirecte *via* un processus inflammatoire [1]. Il s'agit



Société de fabrication de mobilier de bureau : aspiration à la source équipant les machines de l'atelier.

© Claude Alimodovar pour l'INRS / 2022

par exemple de poussières de carbonate de calcium, de silice amorphe, d'alumine, d'acier au carbone, ou encore de polyéthylène.

Lors d'expositions à des concentrations élevées pendant de longues durées, l'afflux des PSES déposées dans les voies respiratoires peut dépasser les capacités d'épuration du poumon (clairances bronchique et alvéolaire) : on parle de « surcharge pulmonaire ». À long terme, cette rétention de particules entraîne une inflammation et peut conduire à des pathologies respiratoires, telles que [1] :

- **la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO)** : il s'agit d'une maladie respiratoire chronique liée à une inflammation des voies respiratoires, et notamment des bronches. Elle se traduit par un épaississement des parois et une hyper-sécrétion réactionnelle de mucus, et peut entraîner une destruction progressive des alvéoles pulmonaires (emphysème). Les causes de la BPCO sont multiples, elles peuvent être personnelles ou environnementales ; la première est le tabagisme [5] ;

- **la fibrose pulmonaire** : la rétention de particules induit une inflammation chronique, qui peut mener à un remodelage tissulaire de type fibrose pulmonaire, et à des troubles respiratoires.

Concernant le potentiel cancérigène des PSES, la plupart des groupes d'experts ou des organismes (MAK, Ilsi, Niosh, Circ)¹ considèrent qu'il ne peut être rejeté comme conséquence possible d'une inflammation chronique, et ce, même s'il n'a pas été démontré chez l'homme (démonstré uniquement chez le rat) [1].

L'exposition aux poussières peut aussi provoquer des lésions d'irritation au niveau de la peau et des muqueuses par un mécanisme non spécifique, appelé « irritation mécanique ».

Toxicité spécifique de certaines poussières

Certaines poussières comme celles de silice cristalline, de farine, de bois, ou encore de plomb, présentent, du fait de leurs propriétés intrinsèques, une toxicité particulière à l'origine d'effets locaux et/ou à distance qui peuvent être graves. Certaines pathologies associées à ces poussières peuvent être reconnues en tant que maladies professionnelles, au titre notamment des tableaux n^{os} 1, 25, 47, 66 et 66 bis du régime général de la Sécurité sociale [4]. Les mécanismes d'action sont divers, il peut s'agir notamment d'effets cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques et sensibilisants.

L'inhalation et la rétention de particules inorganiques (minérales ou métalliques) dans l'arbre respiratoire peuvent entraîner une pathologie respiratoire non maligne, appelée pneumoconiose. Son nom varie selon la particule impliquée : on parle d'asbestose pour l'amiante, de silicose pour la silice cristalline, de sidérose pour le fer, de

ENCADRÉ

LES POUSSIÈRES À EFFETS NON SPÉCIFIQUES RECONNUES COMME DANGEREUSES POUR LA SANTÉ

En 2015, l'Anses a été saisie par la Direction générale du travail pour mener des travaux d'expertise pour la révision des limites de concentrations moyennes en poussières totales et alvéolaires dans les locaux à pollution spécifique sur huit heures (qui étaient alors à 10 mg/m³ pour la fraction inhalable et à 5 mg/m³ pour la fraction alvéolaire). À l'issue de cette expertise, et compte tenu de la toxicité potentielle de ces poussières, l'Anses a recommandé l'abaissement de ces valeurs [1], ce qui a été mis en place par la réglementation de façon progressive, pour s'établir, depuis le 1^{er} juillet 2023, à 4 mg/m³ pour la fraction inhalable (poussières totales) et à 0,9 mg/m³ pour la fraction alvéolaire [6].

stannose pour l'étain... Selon la nature et la cytotoxicité des particules, la pneumoconiose est à l'origine d'altérations plus ou moins prononcées de la fonction respiratoire, d'une bronchopneumopathie chronique obstructive, d'une fibrose pulmonaire, voire prédispose aux infections et au cancer pulmonaire (par exemple, la silicose est associée à une majoration du risque de cancer bronchopulmonaire et de tuberculose). Il s'agit le plus souvent d'effets différés. Le rôle de facteurs individuels, comme certains polymorphismes génétiques dans le développement et la susceptibilité aux pneumoconioses, est suspecté [7].

D'autres pathologies respiratoires non malignes peuvent être secondaires à l'inhalation de particules. L'inhalation de silice cristalline est par exemple associée à une fibrose pulmonaire, appelée pneumopathie infiltrante diffuse, ou encore à une maladie inflammatoire qui touche préférentiellement les poumons, la sarcoïdose. Des pathologies respiratoires résultant d'un mécanisme toxique peuvent aussi être observées. En milieu agricole, il s'agit par exemple de bronchite chronique et de syndrome toxique des poussières organiques (syndrome pseudo-grippal consécutif à une exposition massive et inhabituelle [8]).

L'exposition à certaines particules peut aussi entraîner des pathologies non respiratoires. L'inhalation de silice cristalline est associée à des maladies auto-immunes (exemples : polyarthrite rhumatoïde, lupus, sclérodermie) ou encore, à des maladies rénales [9-10]. L'inhalation ou l'ingestion de poussières de plomb peut être à l'origine d'une intoxication qui se caractérise par une atteinte de plusieurs organes avec des signes neurologiques, rénaux, osseux, digestifs, hématologiques, des effets sur la reproduction..., voire, chez l'enfant, par une atteinte du développement [11].



Des pathologies cancéreuses peuvent aussi être induites par l'inhalation de particules. L'inhalation de poussières de bois peut par exemple être à l'origine de cancers des cavités nasales et sinusiennes [12]. En 2017 en France, la part de cancer de la cavité nasale attribuable chez les hommes à une exposition professionnelle aux poussières de bois a été estimée entre 2,7 et 5,7 % (soit entre 15 et 31 cas par an) et la part de cancer du nasopharynx entre 0,6 et 12,2 % (soit entre 2 et 47 cas par an) [13]. L'inhalation d'amiante provoque différents types de cancers, notamment le cancer bronchopulmonaire, le mésothéliome, le cancer du larynx et des ovaires [14]. En 2017 en France, la part de cancer du poumon attribuable chez les hommes à une exposition professionnelle à l'amiante a été estimée entre 2,9 et 6,6 % (soit entre 862 et 1974 cas par an) et à une exposition professionnelle à la silice cristalline entre 1,1 et 3 % (soit entre 322 et 912 cas par an) [13-14]. Enfin, certaines particules présentent des propriétés sensibilisantes ou allergisantes. Lors de contacts répétés par voie cutanée ou respiratoire, elles peuvent induire chez certains sujets une sensibilisation (initiation de la réponse immunitaire, asymptomatique) et, lors de contacts ultérieurs, une réaction allergique (déclenchement de la réponse immunitaire et des signes cliniques). Les manifestations allergiques professionnelles les plus fréquentes sont cutanées (dermatite de contact allergique ou eczéma, urticaire de contact allergique et dermatite de contact aux protéines) et respiratoires (rhinite, asthme, pneumopathie d'hypersensibilité). Les agents à l'origine de ces manifestations peuvent être minéraux ou organiques (animal ou végétal) : nickel, bois, farine... La farine constitue la première cause d'asthme professionnel [15]. L'allergène responsable peut être contenu dans la céréale elle-même (blé, seigle, orge, avoine...), dans des contaminants (acariens, moisissures...), mais cela peut également être un additif (enzymes...) [16-18].

Conclusion

La toxicité des poudres et poussières est complexe à appréhender, du fait de leur grande diversité. La pénétration des particules dans l'organisme, leur devenir et leur toxicité sont fonction non seulement des caractéristiques des particules, mais aussi de l'exposition et de l'individu. Les quelques exemples développés dans cet article (poussières avec ou sans effet spécifique) illustrent la diversité des profils toxicologiques. Quel que soit le type de particules, la prévention doit donc s'attacher à limiter autant que possible l'exposition des travailleurs aux poussières. Le service de prévention et de santé au travail joue un rôle important dans cette stratégie de prévention, en informant

et conseillant sur les risques et les mesures de prévention à respecter, et en organisant le suivi de l'état de santé des travailleurs. ●

1. MAK : Commission MAK (Allemagne : Maximale Arbeitsplatz Konzentrationen) / ILSI : International Life Sciences Institute / NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health (États-Unis) / CIRIC : Centre international de recherche sur le cancer.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ANSES – Valeurs limites d'exposition en milieu professionnel. Les poussières dites sans effet spécifique (effets sanitaires). Avis de l'Anses / Rapport d'expertise collective, 2019, 92 p. Accessible sur : www.anses.fr
- [2] INRS – Les nanomatériaux manufacturés. Définitions, effets sur la santé, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention. ED 6050, 2021, 58 p. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206050>
- [3] INRS – Fiches Toxicologiques – Guide de lecture. 2023. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox.html>
- [4] INRS – Base de données « Tableaux des maladies professionnelles ». Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/mp.html>
- [5] INSERM – Dossier Web. Bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO). 2020. Accessible sur : <https://www.inserm.fr/dossier/bronchopneumopathie-chronique-obstructive-bpco/>
- [6] INRS – Base de données « Valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) – Substances chimiques ». Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/vlep.html>
- [7] CHAIR S.Y. ET AL. – Genetic susceptibility in pneumoconiosis in China: a systematic review. *Int Arch Occup Environ Health*, 2023, 96 (1), pp. 45-56. Accessible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35906431/>
- [8] INRS – Risque biologique et maladies respiratoires d'origine allergique ou toxique en milieu agricole. ED 4415, 2018. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204415>
- [9] INRS – Fiche Toxicologique n° 232 – Silice cristalline. 2022. Accessible sur : https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_232
- [10] ANSES – Dangers, expositions et risques relatifs à la silice cristalline. Avis de l'Anses / Rapport d'expertise collective, 2019. Accessible sur : <https://anses.fr/fr/system/files/AIR2015SAO236Ra.pdf>
- [11] INRS – Fiche Toxicologique n° 59 – Plomb. 2020. Accessible sur : https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_59
- [12] INRS – Dossier Web « Poussières de bois ». 2022. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/poussieres-bois/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- [13] MARANT-MICALLEF C. ET AL. – Estimated number of cancers attributable to occupational exposures in France in 2017 : an update using a new method for improved estimates. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2023, 33, 1, pp. 125-131. Accessible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34172838/>
- [14] INRS – Fiche Toxicologique n° 145 – Amiante. 2018. Accessible sur : https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_145
- [15] INRS – Allergie respiratoire du boulanger. *Documents pour le médecin du travail*, 2002, 90, TR 29, pp. 189-196. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TR%2029>
- [16] INRS – Dermatite de contact aux protéines. *Références en santé au travail*, 2017, 152, TA 102, pp. 131-142. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TA%20102>
- [17] INRS – Dossier Web « Poussières ». 2022. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/poussieres/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- [18] INRS – Dossier Web « Agents sensibilisants ». 2021. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/agents-sensibilisants/effets-sante.html>

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS COMPORTEMENTALES DES POUDRES : L'ÉCOULEMENT ET LA PULVÉRULENCE

De nombreux secteurs industriels (agroalimentaire, métallurgie, pharmacie, menuiserie, boulangerie, chimie...) utilisent ou produisent des matériaux sous forme de poudres. Sur l'ensemble de leur cycle de vie, des poudres de compositions chimiques diverses sont produites, transportées, stockées, manipulées, mélangées..., au cours de différents procédés. Cet article aborde la caractérisation du comportement des poudres en matière d'écoulement, propension à se mettre en mouvement, et de pulvérulence, propension à se disperser dans l'air. Ces propriétés peuvent être à l'origine de situations d'expositions professionnelles diverses.

SÉBASTIEN BAU
INRS,
département
Métrologie
des polluants

VÉRONIQUE FALK,
MARIA-GRACIELA CARES,
PHILIPPE MARCHAL
Laboratoire
réactions
et génie
des procédés,
LRGP-ENSIC

L'écoulement d'une poudre : qu'est-ce que c'est ?

Un milieu granulaire peut être décrit comme un ensemble de particules solides dans un environnement gazeux ou liquide, où chaque grain interagit avec de nombreux voisins et ne peut pas être considéré comme indépendant. Ces multiples interactions dominent son mouvement.

Les grains interagissent essentiellement par contact (entraînement, friction) ; c'est par exemple

le cas du sable, du charbon, du gravier ou des céréales. Lorsque les grains sont plus petits, globalement inférieurs à 1 mm, on parle de poudres, où d'autres types de forces d'interaction apparaissent : forces électrostatiques ou électromagnétiques (Van der Waals, liaisons hydrogènes), ponts liquides. Ces forces à courte portée entre les grains voisins contribuent à la cohésion des poudres ou à leur adhésion aux surfaces (parois

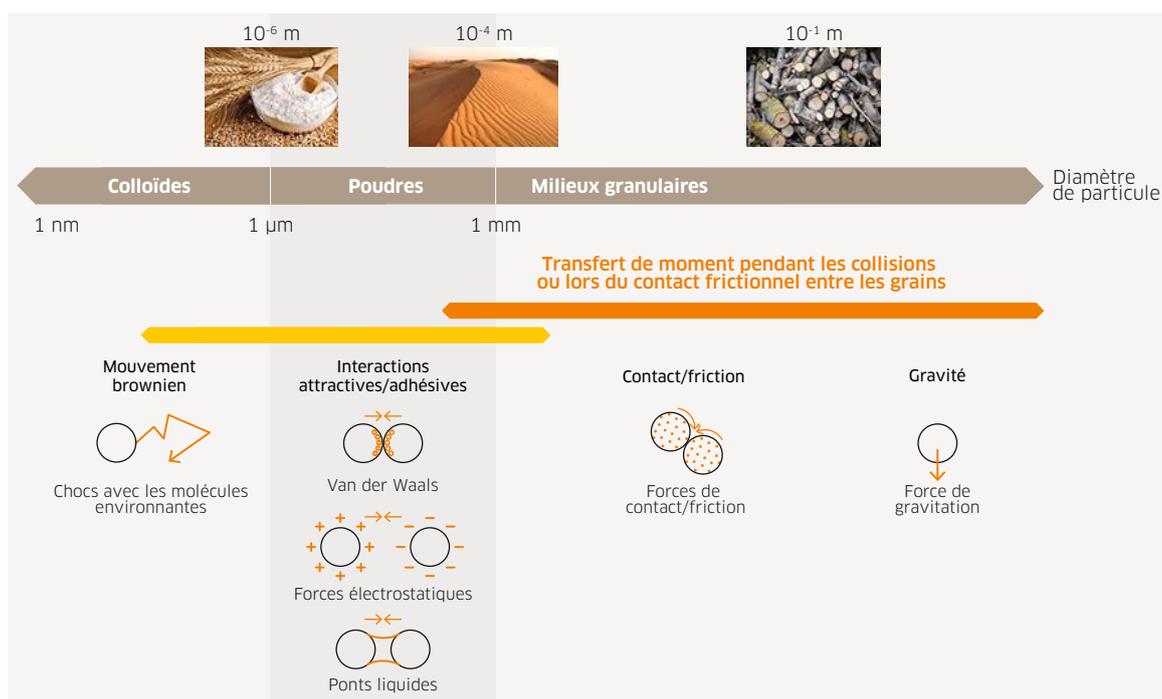


FIGURE 1 → Classification physique des poudres en fonction de leur taille et des interactions qui gouvernent le mouvement des grains.

**ENCADRÉ 1
LES TROIS ÉTATS DE LA POUDRE**

Les poudres se comportent de façon très différente selon le mode et l'amplitude des sollicitations mécaniques qu'elles subissent [1]. Par exemple, un ensemble de grains déposé dans une benne peut former un tas statique qui se comporte comme un solide. Dans ce régime « solide », le système est dominé par des interactions de contact permanent entre les grains. Lorsque la benne est déchargée, le système est fortement perturbé et il est possible d'observer un milieu agité avec des particules en mouvement. Les grains les plus en surface, les plus dilués, vont pouvoir se mouvoir dans tous les sens et interagir par des collisions. Dans cet état, le milieu a un comportement qui peut approcher celui d'un « gaz ». Entre la surface et le fond, on observe un écoulement dense, où les grains interagissent à la fois par collisions et contacts frictionnels de plus longue durée, qui s'apparente alors à un « liquide ». Ces différents états peuvent coexister au sein d'une opération unitaire (cas du transport) mais aussi tout au long du cycle de vie de la poudre.



© Gaël Kerbaol/INRS/2015

↑ FIGURE E1 États de la poudre lors du déchargement d'une benne.

des réacteurs, des trémies, des silos, des sacs...). Ainsi, les poudres peuvent évoluer vers des configurations où les grains se bloquent les uns les autres. Un écoulement peut se trouver bloqué par la formation de « voûtes internes », typiquement rencontrées dans des trémies d'alimentation et des silos de stockage ou par la densification du milieu granulaire par vibration lors du transport. On parle alors de « consolidation de la poudre ». Pour les particules encore plus petites, inférieures à 1 µm, le mouvement n'est plus gouverné par l'interaction entre grains mais par des chocs avec le gaz ou le liquide environnant qui induisent un mouvement aléatoire des grains, le mouvement brownien (Cf. Figure 1).

Méthodes de caractérisation de ces états : de la coulabilité à l'empoussiérement

À défaut d'une définition universelle, le comportement rhéologique des poudres, ou plus spécifiquement la « coulabilité », est assimilé à la capacité de l'ensemble du matériau à s'écouler (Cf. Encadré 1). Plusieurs stratégies sont habituellement proposées pour évaluer le comportement dynamique d'une poudre. En général, chaque technique permet de mesurer une propriété spécifique de la poudre, celle-ci ayant été corrélée à sa capacité d'écoulement, notamment parce que la propriété mesurée est le reflet macroscopique des interactions entre particules. De nombreuses propriétés des particules peuvent avoir une influence sur le comportement des poudres, comme le schématise la Figure 2. Il existe alors une large panoplie de techniques, allant des plus empiriques aux plus élaborées et quantitatives (Cf. Tableau 1). Si la mesure d'un paramètre se fait sur une poudre au repos, alors la technique utilisée sera dite « statique ». Si la poudre est continuellement en mouvement durant la mesure, la technique utilisée sera qualifiée de « dynamique ». Enfin, lorsque le paramètre est mesuré au repos, mais consécutivement à une succession d'états dynamiques et statiques de la poudre, la technique sera dite « quasi statique » [2].

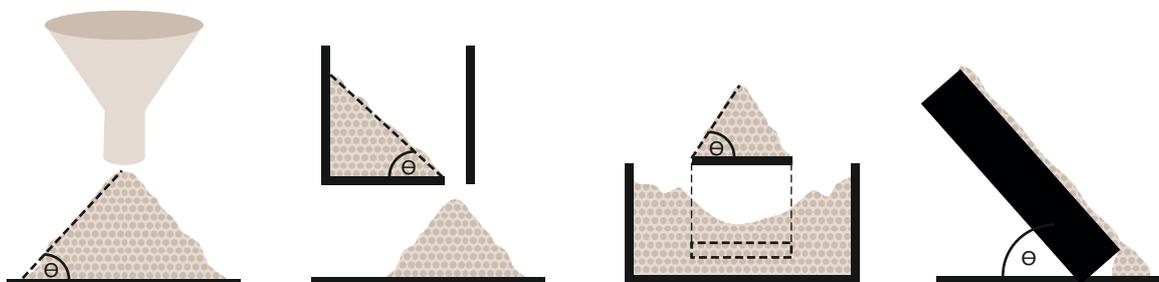
Caractérisations à l'état « solide » : les mesures statiques ou quasi statiques

Chaque année, plus de 50 milliards de tonnes de sable et plus de 765 millions de tonnes de blé sont stockées et/ou transportées dans le monde. Établir une relation entre consolidation et écoulement devient alors nécessaire, lorsqu'il s'agit, par exemple, de vidanger un silo ou de décharger un camion benne. Qu'il s'agisse de manipuler quelques grammes ou plusieurs tonnes de poudre, un « bon écoulement » implique que les grains ne doivent pas se consolider pendant le stockage ou le transport, pour garder leur capacité à s'écouler

FIGURE 2 → Propriétés physicochimiques des poudres ayant une influence sur leur aptitude à s'écouler ou à générer des poussières.

Taille	
Forme	
Rugosité	
Densité	
Chimie de surface	
État d'agglomération /cohésion	

CATÉGORIE	STATIQUE	QUASI- STATIQUE	DYNAMIQUE			
Méthode	ANGLE DE REPOS	COMPACITÉ	CISAILLEMENT	DÉBIT À TRAVERS UN ORIFICE	ANGLE DYNAMIQUE	LIT FLUIDISÉ
Propriété mesurée	Limite de rupture de l'empilement	Capacité à se densifier ou consolider	Rupture plastique	Aptitude à passer à travers un orifice	Instabilité du lit	Perte de pression
Appareils	<ul style="list-style-type: none"> • PT-X • AOR device • Granuheap 	<ul style="list-style-type: none"> • PT-X • Densitap • Granupack • FT4 • Presse 	<ul style="list-style-type: none"> • RST-XS Schulze • Brookfield PFT • FT4 • Sevilla PT • Evolution PT 	<ul style="list-style-type: none"> • Granuflow • Hall Flowmeter • Flowdex 	<ul style="list-style-type: none"> • Tambour tournant • Revolution PT • Granudrum 	<ul style="list-style-type: none"> • FT4 • Colonne de fluidisation • Tambour tournant fluidisé
Indice d'écoulement	Angle de repos	Indices de Carr et Hausner	Fonction d'écoulement (<i>flow factor</i>) et cohésion	Débit de décharge	Angle d'avalanche	Expansion du lit Vitesse minimale de fluidisation
Quantités d'échantillon	4 – 200 mL	150 mL	10 – 300 mL	50 – 200 g 25 – 500 mL	10 – 500 mL	35 mL
Normes associées	NF 12047:1997 ISO 8398:1989 ISO 4324:1977 ISO 902:1976	NF 1237:1995 ISO/ASTM 52925 ISO 9161:2021 ISO 23145-2:2016	ASTM D7891-15 ASTM D6773-16 ASTM D6128-16	ISO 14629:2016 ISO 4490:2018 ISO 13517		



↑ TABLEAU 1
Résumé et analyse de techniques d'évaluation de la coulabilité [2-3].

← FIGURE 3
Angles caractéristiques des poudres après écoulement : angle de tas, angle de rebord, angle de spatule, angle d'écoulement ou de glissement.

d'une trémie ou d'un silo sous l'effet de la pesanteur. Deux grandes familles d'instruments peuvent être citées.

Dans la première, ce sont les mesures de densités tassées et non tassées où la poudre est consolidée sous vibration (Densitap, Granupack). Cette méthode indirecte estime qualitativement la coulabilité, à l'aide d'indicateurs obtenus à partir de mesures de masses volumiques, que l'on peut relier à la capacité d'écoulement de la poudre: une poudre qui se compacte bien s'écoule mal.

Dans la deuxième famille, ce sont des cellules de cisaillement (Schulze, PPFT, FT4) qui sollicitent la poudre par des contraintes normales et tangentielles connues, la consolidation est donc obtenue par compression uniaxiale. Ces derniers outils ont

été principalement dédiés au dimensionnement des silos [4].

Caractérisation à l'état « liquide » : les mesures dynamiques

Si dans le cas des fluides, la rhéologie s'est imposée pour caractériser leur capacité à se mettre en mouvement sous l'effet d'une sollicitation, l'accès à cette propriété est beaucoup plus délicat dans le cas de matières dispersées, notamment des poudres. Les appareils les plus utilisés dans l'industrie permettent de déterminer des angles caractéristiques des poudres après écoulement (angles de tas, de spatule, d'écoulement ou d'éboulement; Cf. Figure 3), qui aboutissent souvent à une qualification simpliste de la poudre comme « matériau



La coulabilité et l'empoussièrement sont interprétés à partir d'un indice qui ne rend compte que de la capacité de la poudre à s'écouler ou se mettre en suspension dans des conditions mécaniques spécifiques.



FIGURE 4 → Différence entre coulabilité et aptitude à s'écouler, la complexité de la prédiction.

© Droits réservés (DR)

cohésif » ou « matériau à écoulement libre », au même titre que les mesures de densités tassées et non tassées. Ces mesures sont donc peu adaptées à une comparaison fine des propriétés d'écoulement. Citons également débitmètre, tambour tournant, plan incliné et lit fluidisé.

Une dernière stratégie est de s'intéresser aux outils classiques de la rhéologie et de les adapter aux contraintes spécifiques des poudres, afin de disposer d'une signature rhéologique. Les mesures habituellement employées dans ce domaine ont montré leur pertinence en vue de différencier des échantillons non différenciables par d'autres techniques [5]. Cependant, elles ne sont pas standardisées sous la forme d'un indice de coulabilité et nécessitent un personnel qualifié pour les mettre en œuvre et exploiter les données.

En résumé, les techniques d'évaluation de la coulabilité présentées ci-dessus sont utilisées depuis longtemps de manière systématique. Ces appareils de mesure, et les résultats qui en découlent, sont très souvent source de confusion au sein des industries manipulant des poudres, mais aussi dans le domaine de la recherche. En effet, une technique donnée peut conclure qu'une poudre A s'écoule mieux qu'une poudre B, tandis que les résultats issus d'une autre technique indiqueront l'inverse. Cette problématique est la conséquence des larges gammes de conditions environnementales et mécaniques auxquelles les poudres sont soumises dans les appareils de caractérisation. En effet, la coulabilité n'est pas une propriété intrinsèque à la poudre. Elle dépend, notamment, de la géométrie de l'appareil et de l'énergie fournie lors de l'analyse, ainsi que des conditions environnementales, telles que le taux d'humidité et la température. En conclusion, la coulabilité d'une poudre devrait être définie comme son aptitude

à s'écouler dans un appareil donné, dans des conditions données (Cf. Figure 4).

La méthode à utiliser doit ainsi être la plus proche possible du procédé pour lequel on veut prédire le comportement. Par exemple, les poudres qui ont tendance à s'agglomérer ou à s'accumuler à l'intérieur des équipements tels que les silos de stockage peuvent être étudiées à partir de techniques statiques – poudre à l'état solide – car elles sont dans un état compact. *A contrario*, les procédés impliquant des étapes de fluidisation ou de transport pneumatique sont à étudier à partir de techniques dynamiques, car les particules sont dispersées et en mouvement.

Caractérisation à l'état « gazeux » : les mesures de pulvérulence

Lorsque l'énergie fournie à la poudre est suffisamment importante pour vaincre les forces interparticulaires, la poudre peut se comporter comme un gaz. On parle alors de « pulvérulence » ou d'« empoussièrement ». Les poudres constituent ainsi une source potentielle d'émission de particules dans l'air, et par conséquent d'exposition des travailleurs à des aérosols.

Comment quantifier la pulvérulence d'une poudre ?

La pulvérulence d'une poudre représente son potentiel à générer un aérosol lorsqu'elle est soumise à une contrainte mécanique [6]. Au-delà de son état physique (poudre, granulés, pastilles) et de ses propriétés intrinsèques (cohésion, masse volumique, affinité avec l'eau), la pulvérulence d'une poudre est une grandeur soumise à différents paramètres d'influence, notamment les conditions mécaniques de mise en suspension (mode, niveau d'énergie, géométrie du disposi-

tif) ou encore les conditions environnementales (humidité relative). Compte tenu de la pluralité des scénarios de mise en œuvre de produits pulvérulents tout au long de leur cycle de vie, il n'est pas possible de définir une seule et unique méthode d'essais pour déterminer la pulvéulence d'une poudre. En effet, ce paramètre doit être évalué dans des conditions les plus représentatives des situations réelles.

Généralement, la pulvéulence représente la masse de particules émises dans l'air lors d'un procédé simulé par une méthode d'essais rapportée à la quantité de poudre initiale ; elle est exprimée sous forme d'indice (en mg/kg de poudre). Les indices de pulvéulence sont, dans ce cas, déterminés par gravimétrie sur les supports de prélèvement des aérosols et sont exprimés dans au moins l'une des trois fractions conventionnelles (inhalable, thoracique et alvéolaire [7], notées I, T et R respectivement) liées aux effets sur la santé détaillés dans l'article précédent (Cf. pp. 24-28). Dans cet article, ces indices seront notés $DI_{M,X}$, où X représente la fraction concernée (I, T, R) et M signifie « exprimé en unité de masse ».

Plus récemment, en lien avec le développement de nouvelles méthodes ou l'adaptation de méthodes existantes aux nanomatériaux, d'autres grandeurs ont été ajoutées, parmi lesquelles l'indice de pulvéulence en nombre (exprimé en nombre de particules émises par mg de poudre et noté $DI_{N,X}$) ou encore, la caractérisation de la morphologie (φ) et de la composition chimique (χ) des particules [8]. Ces paramètres complémentaires reposent sur l'utilisation de moyens de mesure en temps réel des aérosols, d'un dispositif de prélèvement adapté à l'observation subséquente de l'échantillon en microscopie électronique et de méthodes analytiques pertinentes pour la caractérisation chimique des particules.

Des paramètres issus de la distribution granulométrique en nombre, notée $f_N(d_p)$, et en masse, $f_M(d_p)$, ont également été intégrés (Cf. Encadré 2), dans la gamme couverte par la fraction alvéolaire, en accord avec les préconisations relatives à la mise en œuvre de nanomatériaux [9]. Comme cela a déjà été indiqué (Cf. Article pp. 24-28), la granulométrie des aérosols contribue à une meilleure compréhension des effets sur la santé des particules inhalées, et permet également de dimensionner des éléments de protection adaptés.

Les différentes méthodes d'essais pour la caractérisation de la pulvéulence

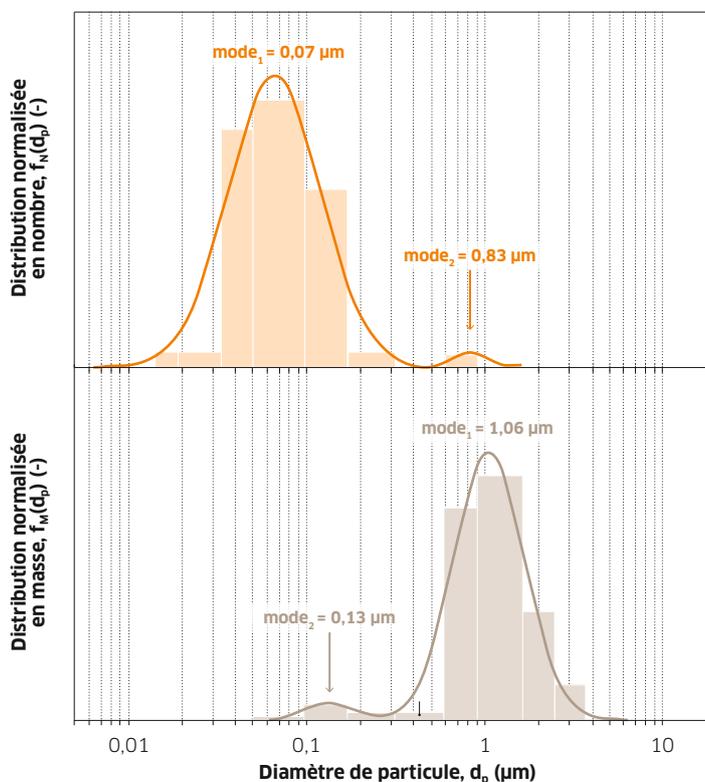
Les différentes méthodes d'essais permettant de caractériser la pulvéulence des poudres et qui font l'objet de références normatives sont :

ENCADRÉ 2

COMMENT CARACTÉRISER LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES AÉROSOLS ?

Les aérosols qui peuvent être émis lors d'opérations mettant en œuvre des poudres sont polydispersés, c'est-à-dire constitués de particules de tailles différentes, couvrant généralement plusieurs ordres de grandeur. La distribution granulométrique d'un aérosol décrit la répartition des particules en fonction de leur taille ; elle peut être représentée sous forme d'un histogramme avec, en abscisse, la taille des particules, habituellement sous forme de canaux et, en ordonnée, la grandeur mesurée [10].

À partir des distributions dites normalisées, il est alors possible d'utiliser différents descripteurs de la granulométrie, parmi lesquels le diamètre modal, qui correspond au diamètre associé au plus grand nombre d'observations. À titre d'exemple, la Figure E2 présente les distributions granulométriques normalisées en nombre ($f_N(d_p)$, haut) et en masse ($f_M(d_p)$, bas) d'un même aérosol, ainsi que les modes associés. Selon la quantité choisie, il convient de noter que les modes principaux ($mode_1$) et secondaires ($mode_2$) peuvent être significativement différents.



↑ FIGURE E2 Exemples de distributions granulométriques en nombre (haut) et en masse (bas) d'un même aérosol.



- le tambour rotatif (RD) ;
- le petit tambour rotatif (SRD) ;
- la chute continue (CD) ;
- l'agitateur vortex (VS).

Les caractéristiques de ces méthodes d'essais ainsi que les exigences associées sont répertoriées dans le *Tableau 2*.

Les méthodes d'essais des tambours rotatifs (RD et SRD) et de la chute continue (CD) simulent des opérations de manipulation de poudre ; elles diffèrent sur l'intensité et la durée d'application de l'énergie. En effet, dans les méthodes impliquant un tambour rotatif, les matériaux chutent plusieurs fois d'une faible hauteur, tandis qu'une unique chute de plus grande hauteur a lieu dans la méthode de la chute continue. Enfin, la méthode de l'agitateur vortex (VS) ayant pour but de simuler des scénarios plus défavorables, une énergie plus importante est appliquée à la poudre. Par conséquent, cette méthode d'essais peut être considérée comme représentative d'un cas majorant.

Pour les deux méthodes d'essais historiques que sont le tambour rotatif (RD) et la chute continue (CD), les indices de pulvéulence en masse sont classés dans quatre catégories (très faible, faible, modérée, haute). Les seuils séparant ces catégories ont été établis à partir de la distribution des indices observés sur plus de 200 matériaux pour la méthode du tambour rotatif, et de 500 matériaux en ce qui concerne la méthode de la chute continue.

Il est important de noter que seuls les indices acquis selon la même méthode d'essais peuvent être comparés, chacune d'elles étant adaptée à un type de sollicitation.

Les paramètres influant sur les indices de pulvéulence

Les paramètres influençant les indices de pulvéulence obtenus peuvent être répartis en deux catégories ; il s'agit d'une part de la méthode d'essais mise en œuvre, et d'autre part des propriétés du matériau divisé.

↓ **TABLEAU 2**
Description des méthodes d'essais normalisées pour la caractérisation de la pulvéulence des poudres.

MÉTHODE	TAMBOUR ROTATIF (RD)		PETIT TAMBOUR ROTATIF (SRD)	CHUTE CONTINUE (CD)		AGITATEUR VORTEX (VS)
Norme	NF EN 15051-2+A1 (2017) ^A	NF EN 17199-2 (2019) ^B	NF EN 17199-4 (2019) ^C	NF EN 15051-3 (2014) ^D	NF EN 17199-3 (2019) ^E	NF EN 17199-5 (2019) ^F
Mouvement	Multiples chutes			Chute continue		Vibration
Procédé ou activité simulés	Manipulation, agitation, brassage de poudre					Nettoyage de poste, vibration durant un transport de poudres, situations accidentelles
Grandeurs requises	$DI_{M,I}$ $DI_{M,T}$ $DI_{M,R}$	$DI_{M,I}$ $DI_{M,T}$ $DI_{M,R}$ $DI_{N,R}$ $\tau_{N,R}^G$ $f_N(d_p)$	$DI_{M,R}$ $DI_{N,R}$ $\tau_{N,R}^G$ $f_N(d_p)$	$DI_{M,I}$ $DI_{M,R}$	$DI_{M,R}$ $DI_{N,R}$ $\tau_{N,R}^G$ $f_N(d_p)$	$DI_{M,R}$ $DI_{N,R}$ $\tau_{N,R}^G$ $f_N(d_p)$
Grandeurs optionnelles		$f_M(d_p)$ φ χ	$f_M(d_p)$ φ χ		$DI_{M,I}$ φ χ	$f_M(d_p)$ φ χ
Quantité d'échantillon nécessaire pour un essai	35 cm ³		6 g (< 56 cm ³)	100 g		0,5 cm ³
Durée du stimulus mécanique	65 secondes		60 secondes	10 minutes		65 secondes

A. Norme NF EN 15051-2 + A1 - Exposition sur les lieux de travail - Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux pulvérulents en vrac - partie II : méthode du tambour rotatif.

B. Norme NF EN 17199-2 - Exposition sur les lieux de travail - Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux en vrac contenant des nano-objets et leurs agrégats et agglomérats (NOAA) ou autres particules en fraction alvéolaire - partie II : méthode du tambour rotatif.

C. Norme NF EN 17199-4 - Exposition sur les lieux de travail - Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux en vrac contenant ou émettant des nano-objets et leurs agrégats et agglomérats (NOAA) ou autres particules en fraction alvéolaire - Partie 4 : méthode impliquant l'utilisation d'un petit tambour rotatif.

D. Norme NF EN 15051-3 - Exposition sur les lieux de travail -

Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux pulvérulents en vrac - Partie 3 : Méthode de la chute continue.

E. Norme NF EN 17199-3 - Exposition sur les lieux de travail - Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux en vrac contenant des nano-objets et leurs agrégats et agglomérats (NOAA) ou autres particules en fraction alvéolaire - Partie 3 : méthode de la chute continue.

F. Norme NF EN 17199-5 - Exposition sur les lieux de travail - Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux en vrac contenant ou émettant des nano-objets et leurs agrégats et agglomérats (NOAA) ou autres particules en fraction alvéolaire - Partie 5 : Méthode impliquant l'utilisation d'un agitateur vortex.

G. $\tau_{N,R}$ représente le taux d'émission de particules, exprimé en nombre de particules par milligramme de poudre et par seconde.



Le petit tambour rotatif est un dispositif de mesure permettant de caractériser l'émission d'aérosols à partir de poudres (ou pulvérulence). Essai en laboratoire à l'INRS.

© Serge Marillon pour l'INRS / 2021

En ce qui concerne l'influence de la méthode d'essais, Witschger et Dazon [8] ont mis en évidence, sur une vingtaine de matériaux, que les indices de pulvérulence en masse et en nombre obtenus par la méthode de l'agitateur vortex (VS) sont supérieurs d'un facteur environ 30 à ceux obtenus selon la méthode impliquant le petit tambour rotatif (SRD). Cette observation confirme que la méthode de l'agitateur vortex impliquant davantage d'énergie conduit à des indices de pulvérulence supérieurs à ceux obtenus par les méthodes reposant sur des mécanismes de chute. Les distributions granulométriques des aérosols ne sont, quant à elles, pas affectées. Il convient ainsi de garder à l'esprit les conditions d'essais dans lesquelles les mesures ont été réalisées, qui peuvent être plus ou moins représentatives des situations réelles de manipulation des poudres.

La seconde catégorie de paramètres d'influence regroupe un ensemble de propriétés du matériau, en particulier les forces de cohésion en son sein (Cf. Figure 1). Tout comme pour les propriétés de coulabilité, leur indice de pulvérulence dépend principalement de la nature chimique et de la taille des particules, ainsi que de leurs propriétés de surface (revêtement, texture, état de charge électrique ; Cf. Figure 2). D'autres grandeurs, telles que l'humidité relative, la surface spécifique¹ et la masse volumique apparente² ont également été investiguées [11]. Il demeure délicat de généraliser les tendances observées dans ces travaux, compte tenu de la diversité des matériaux impliqués.

Le lien avec la prévention Corréler indices de pulvérulence et niveaux d'exposition ?

La pulvérulence d'une poudre peut être considérée comme un facteur déterminant de l'exposition des travailleurs qui la manipulent. Cependant, les résultats obtenus lors de la mise en œuvre de ces méthodes d'essais ne peuvent pas être directement utilisés pour estimer l'exposition professionnelle. Peu de travaux ont cherché à établir des liens entre indices de pulvérulence et exposition, et leurs conclusions peuvent être contradictoires. Il est également important de rappeler que la méthode d'essais pour le mesurage de la pulvérulence doit être choisie soigneusement, de façon à être représentative du scénario d'exposition visé (Cf. Tableau 2).

Quelles applications pour la prévention ?

En l'absence d'une relation univoque entre indices de pulvérulence et expositions professionnelles, la connaissance de ces indices permet néanmoins de procéder à un classement relatif des matériaux de type « selon la méthode X, le matériau A est dix fois plus pulvérulent que le matériau B ». Dès lors, les risques pour la santé, représentés par les poussières en suspension dans l'air peuvent être mieux évalués. De plus, cette évaluation peut être complétée par des éléments relatifs à la distribution granulométrique de l'aérosol, à la morphologie et à la composition chimique des particules émises. Au-delà de la classification des matériaux, l'indice



de pulvéulence constitue désormais une donnée d'entrée dans un certain nombre d'outils de prédiction des expositions ou de *control banding*. Par ailleurs, pour le cas des nanomatériaux, ce paramètre a été intégré à la réglementation Reach depuis janvier 2020³. La pulvéulence d'une poudre pourra également être renseignée dans les fiches de données de sécurité [12].

In fine, la connaissance des indices de pulvéulence des matériaux peut constituer une aide à la mise en place de différentes solutions de prévention, telles que :

- la substitution par des produits de propriétés recherchées identiques présentant des indices de pulvéulence plus faibles ;
- la modification des propriétés des produits (au moyen d'adjuvants par exemple) en vue de réduire les émissions particulaires associées ;
- le dimensionnement d'équipements de protection collective ou individuelle afin de réduire les expositions aux aérosols émis lors des activités ou procédés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ANDREOTTI B., FORTERRE Y., POULIQUEN O. – *Les milieux granulaires : entre fluide et solide*. EDP sciences, 2011.
- [2] SAKER A. – *Étude critique de quelques techniques expérimentales d'évaluation de la coulabilité des poudres*. Université de Lorraine, 2018.
- [3] SALEH K., GUIGON P. – *Caractérisation et analyse des poudres : propriétés comportementales des solides divisés*. Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés, 2009.
- [4] SCHULTZE D. – *Powders and bulk solids: behavior, characterization, storage and flow*, 2021, 642 p.
- [5] CHOPLIN L. ET AL. – *Rhéologie et produits formulés complexes*. Techniques de l'ingénieur. Principes de formulation, 2010.
- [6] LIDÉN G. – *Dustiness testing of materials handled at workplaces*. *Annals of occupational hygiene*, 2006, 50, pp. 437-439.
- [7] INRS – *Les valeurs limites d'exposition professionnelle*. 2022, ED 6443. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206443>
- [8] WITSCHGER O., DAZON C. – Pulvéulence de nanomatériaux : bilan et perspectives d'une décennie d'études et de recherche pour la prévention. In: Dossier – Nanomatériaux. *Hygiène et sécurité du travail*, 2019, 256, DO 26, pp. 41-47. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2026>
- [9] WITSCHGER O. ET AL. – Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en oeuvre des nanomatériaux. *Hygiène et sécurité du travail*, 2012, 226, ND 2355, pp. 41-55. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202355>
- [10] MATERA V., GAUDEL N., BAU S. – Intérêts et optimisation des prélèvements d'aérosols par impacteur en cascade. *Hygiène et sécurité du travail*, 2022, 269, pp. 56-63. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/hst/notes-techniques.html>
- [11] DAZON C. – *Expositions professionnelles aux nanomatériaux lors de la manipulation de poudres : relations entre les propriétés des poudres et les caractéristiques des aérosols émis*. Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille, 2019.
- [12] INRS – *La fiche de données de sécurité*. 2022, ED 6483. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206483>

Quelles pistes pour l'avenir ?

À ce jour, la compréhension des mécanismes mis en jeu et des interactions entre particules, paroi et fluide, reste limitée. Mieux décrire ces phénomènes représente une problématique complexe et repose sur des études théoriques ou paramétriques. Il serait intéressant de poursuivre ce type de travaux pour déterminer des relations entre pulvéulence et propriétés des matériaux, en vue d'adapter les méthodes d'essais, afin qu'elles soient mieux représentatives des situations réelles d'exposition liées à la manipulation de poudres.

Les résultats de mesures de la pulvéulence de multiples matériaux pourraient être capitalisés au sein d'une base de données. L'ensemble pourrait permettre de réviser les seuils de classification selon les quatre catégories (très faible, faible, modéré, élevé) pour les deux méthodes d'essais historiques (tambour rotatif et chute continue), et de faire des propositions pour les plus récentes.

Par la suite, les données de pulvéulence pourraient être croisées avec des données d'exposition, dans l'objectif de mettre en évidence des corrélations ou de déterminer le ou les paramètres d'influence. Par ailleurs, la détermination de paramètres complémentaires (structure cristalline, présence de micro-organismes ou de leurs constituants) pourrait être également réalisée pour certaines catégories de matériaux.

Enfin, la mise en place d'exercices d'intercomparaison reste d'actualité, impliquant à la fois des partenaires disposant de la même méthode et des acteurs mettant en œuvre des méthodes différentes. En effet, de tels exercices permettent en premier lieu de conclure quant à la robustesse et à la reproductibilité d'une méthode donnée, et en second lieu de comparer les classifications de matériaux issues de différentes méthodes. Sans nécessairement se conformer à l'intégralité des exigences relatives aux matériaux de référence, il apparaît nécessaire de pouvoir disposer d'un ou plusieurs matériaux, couvrant idéalement une large plage d'indices de pulvéulence et présentant des répétabilité et reproductibilité élevées. Au-delà des exercices d'intercomparaison, ceci permettra également à chacun des instituts en charge des essais de pulvéulence de réaliser un suivi métrologique des méthodes d'essais qui sont mises en œuvre. ●

1. Rapport entre la surface d'un matériau divisé (hors pores) et sa masse, en m²/g.

2. Rapport entre la masse d'une poudre et le volume (volume des particules constituantes et des vides interparticulaires) qu'elle occupe, en g/cm³.

3. Voir : Règlement n° 2018/1881 de la Commission européenne du 3 décembre 2018.

AMÉLIORER LES PROPRIÉTÉS D'ÉCOULEMENT ET LIMITER L'EMPOUSSIÈREMENT

L'écoulement est l'une des étapes communes à l'ensemble des opérations unitaires de traitement des poudres dans l'industrie. Afin de faciliter cet écoulement tout au long de la ligne du procédé, des agents d'écoulement, souvent des nanoparticules, sans effet sur la propriété d'usage du produit fini, sont ajoutés. Cependant, il existe peu d'informations disponibles pour évaluer les quantités nécessaires et suffisantes au bon écoulement. Ces agents sont souvent ajoutés en excès, ce qui garantit le bon écoulement des poudres, mais entraîne une augmentation de l'exposition des travailleurs aux poussières. Un enjeu est de trouver les meilleures solutions pour garantir la faisabilité du procédé, en optimisant la coulabilité et limiter l'exposition des travailleurs aux poussières et aux nanoparticules et les risques d'explosion.

MARIA-CAMILA JIMENEZ-GARAVITO, FABIEN GÉRARDIN
INRS, département Ingénierie des procédés

VÉRONIQUE FALK, MARIA-GRACIELA-CARES
Laboratoire réactions et génie des procédés, LRGP-ENSIC

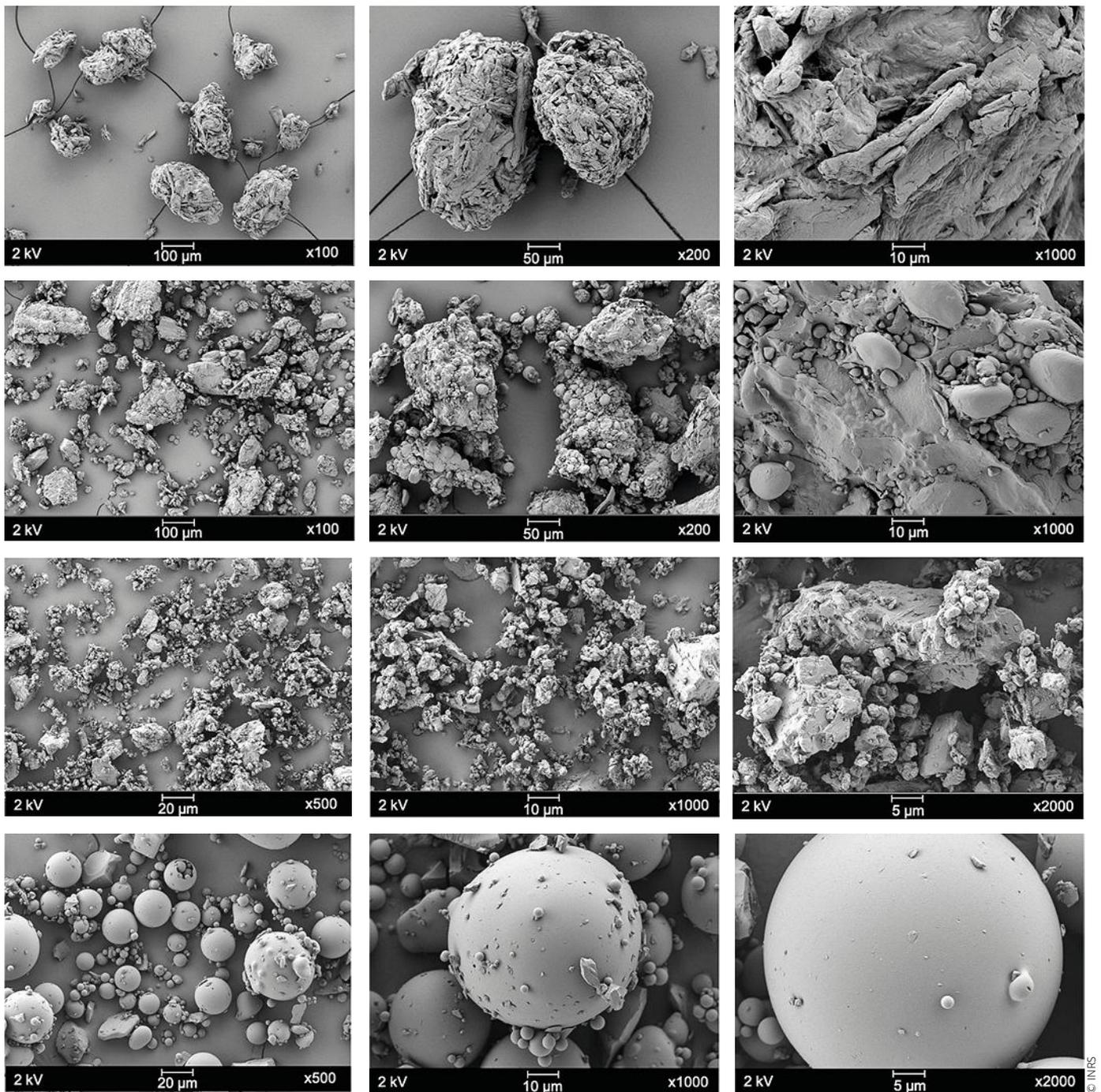
L'écoulement est l'une des étapes communes à l'ensemble des opérations unitaires de traitement des poudres. Il est présent lors du remplissage, de la vidange, du transport, du dosage ou encore du conditionnement des produits. Afin que ces phases soient facilitées et n'entraînent pas de pertes de production, de matière ou de temps, différentes stratégies visant à améliorer les propriétés d'écoulement sont fréquemment déployées :

- **modification des installations en ajoutant, par exemple, des vibrations ou des systèmes mécaniques internes pour forcer l'écoulement.** Ces systèmes sont difficiles à dimensionner et sont rarement universels, c'est-à-dire que s'ils sont adaptés à un produit, ils sont rarement efficaces pour l'ensemble d'une gamme. Par ailleurs, ils nécessitent une source d'énergie, souvent électrique, ce qui peut engendrer d'autres risques ;
- **modification des formulations de produits en ajoutant des additifs dédiés.** Ces agents d'écoulement (« glidants ») doivent être sans effet sur la propriété d'usage du produit fini. Ils présentent l'avantage de s'utiliser sans transformation des installations. Cependant, bien que le catalogue des additifs disponibles soit fourni, il est difficile, pour un industriel, de choisir le bon additif et la bonne quantité ;
- **mise en suspension du produit dans un fluide adéquat (liquide ou gaz) afin de faciliter le trans-**

port et le dosage. Le procédé doit alors subir des modifications majeures, les fluides peuvent avoir une charge polluante très élevée et il est nécessaire de prévoir un système de séparation après le transport.

De ce fait, l'ajout d'additifs est devenu une pratique courante pour la formulation et la mise en forme des produits en poudre dans de nombreux secteurs industriels. Les additifs les plus souvent retenus se présentent sous la forme de nanoparticules (NPs), leur choix et leur dosage relevant d'un savoir-faire interne aux entreprises, généralement acquis par une démarche d'essais/erreurs. De plus, le coût de ces additifs peut s'avérer élevé, notamment pour les produits à faible valeur ajoutée, et il est donc nécessaire d'optimiser leur quantité et leur nature pour obtenir le juste service rendu. Cela nécessite par ailleurs de disposer d'équipements de mesure permettant d'évaluer les propriétés d'écoulement de manière assez précise. Parmi ces additifs, les nanoparticules de silice amorphe (dioxyde de silicium), également appelées silice colloïdale (NPs-SC), sont ajoutées dans un grand nombre de produits, comme les produits pharmaceutiques, les cosmétiques et lors de la fabrication de denrées alimentaires, sans études complémentaires validant leur rôle exact. Elles visent à améliorer le comportement des poudres lors des étapes de transport, de vidange, de dosage ou de remplissage, ce qui facilite les étapes de production pour l'industriel, mais elles apportent rarement





↑ FIGURE 1
 Visualisations
 des échantillons
 par microscopie
 électronique
 à balayage
 à différents
 grossissements.
 Ligne 1 : Avicel®
 PH102 ; ligne 2 :
 farine artisanale
 T45 ; ligne 3 : joint
 fin (MAPEI®) ;
 ligne 4 : billes
 de verre.

une valeur ajoutée au produit fini. Très souvent, le choix de la nature des additifs et de leur quantité est réalisé selon une démarche d'essais-erreurs, ce qui prend du temps et ne garantit pas d'avoir une formulation optimale. Par ailleurs, les résultats obtenus font partie du savoir-faire des industriels et sont rarement publiés. Des quantités allant de 0,5 % à 2 % m/m sont considérées comme des valeurs standards dans l'industrie pharmaceutique, tandis que pour l'industrie alimentaire, des valeurs allant jusqu'à 5 % m/m peuvent être utilisées car elles sont autorisées selon le principe « *quantum satis* » (quan-

tité suffisante) par l'EFSA¹ et elles n'ont pas à figurer sur la liste des ingrédients si elles sont utilisées comme auxiliaire technologique et que leur quantité est inférieure à 1 % en masse [1]. D'après le rapport *R-Nano* de 2019 [2], 10 000 tonnes de NPs-SC ont été fabriquées ou importées en France, mais les produits dans lesquels ces NPs-SC sont employées ne sont pas référencés. La silice amorphe est l'une des NPs les plus utilisées dans l'industrie alimentaire. Cependant, améliorer l'écoulement, c'est-à-dire augmenter la fluidité d'un milieu pulvérulent, peut avoir des conséquences sur la capacité de

ce milieu à émettre des poussières, notamment lors des opérations de transfert. Ce potentiel d'émission est ce qui définit la pulvérulence d'une poudre (« *dustiness* » en anglais). Or, ces poussières présentent un danger direct pour le manipulateur ainsi que pour l'ensemble des personnes présentes dans l'environnement de ces opérations. Des études menées par l'INRS ont mis en évidence que la pulvérulence n'est pas une propriété intrinsèque de la poudre, mais dépend de ses paramètres caractéristiques tels que l'humidité, la distribution de taille des particules, leur morphologie, mais aussi des conditions expérimentales du test [3], comme cela est aussi expliqué dans l'article précédent (Cf. pp. 29-36). Les liens entre pulvérulence et coulabilité d'une poudre ont été peu étudiés au cours des 60 dernières années [4-5]. Récemment, des travaux plus approfondis ont mis en évidence une relation directement proportionnelle entre la qualité d'écoulement et la capacité d'une poudre à générer des poussières [6-7]. Une poudre qui s'écoule bien émet plus de poussières qu'une poudre qui s'écoule mal. Dans leurs travaux, les auteurs soulignent que l'empoussièrment dépend non seulement de la fraction de fines particules présentes dans l'échantillon, mais aussi de la capacité du matériau à « relâcher » ces particules, qui est fonction de la nature et de l'intensité des contraintes appliquées à la poudre. Ces travaux, menés sur des poudres de tailles comprises entre 2 et 294 μm et de masses volumiques comprises entre 2650 et 4680 kg/m^3 , ne considèrent pas les poudres de plus faibles masses volumiques, comme les poudres alimentaires, et n'envisagent pas le cas des modifications de formulation par l'ajout d'additifs, pratique pourtant extrêmement fréquente dans l'industrie. En perturbant les interactions particulières, ces additifs sont en effet susceptibles d'augmenter la capacité d'une poudre à « libérer » de plus grandes quantités de fines particules, effet qui a déjà été mis en évidence lors de mesures d'énergies minimales d'inflammation [8]. Il apparaît donc important d'étudier conjointement les propriétés d'écoulement et les émissions de poussières, tant en quantité qu'en composition.

Cas d'étude : entre un bon écoulement et peu d'empoussièrment

Le cas d'étude suivant s'intéresse à l'utilisation des NPs-SC amorphes dans des formulations représentant différents secteurs industriels. Plusieurs paramètres ont été étudiés, afin d'évaluer s'il est possible d'améliorer les propriétés d'écoulement sans augmenter la quantité de poussières.

Effet des nano-additifs sur l'écoulement

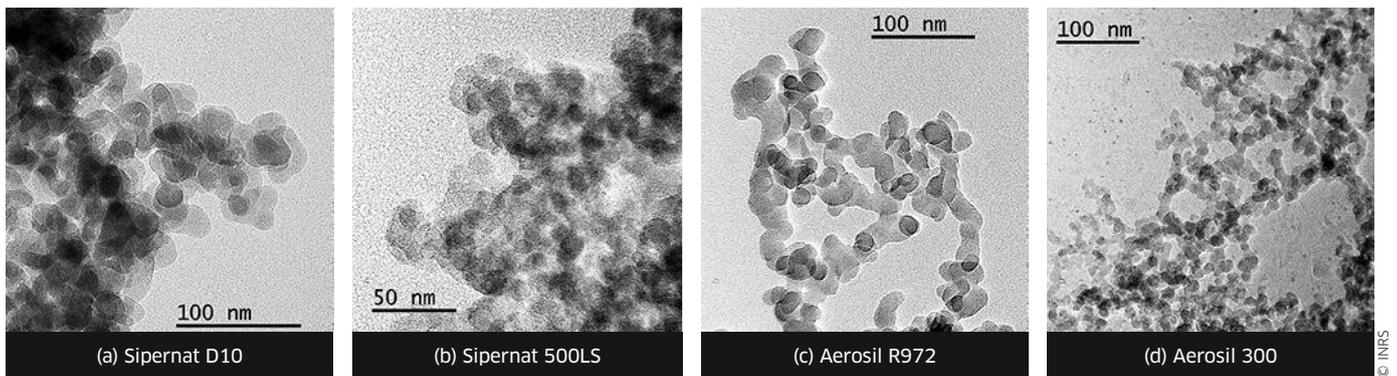
Quatre produits granulaires couramment utilisés dans l'industrie ayant des tailles, formes, rugo-



© Claude Almodovar pour l'INRS / 2021

sités et comportement en écoulement variés, ont été sélectionnés : cellulose microcristalline (MCC), farine de blé, joint fin et billes de verre (Cf. Figure 1). Afin de s'assurer que la farine n'avait pas été traitée avec des agents d'écoulement, une farine artisanale T45 a été choisie et obtenue auprès de la minoterie Poinignon (Foulligny, France, $d_{50} = 83 \mu\text{m}$). Le MCC (Avicel® PH102 de FMC Biopolymer®, $d_{50} = 111 \mu\text{m}$) est fréquemment ajouté comme excipient de compression en cosmétique et en pharmacie. Le joint fin (MAPEI®, $d_{50} = 18 \mu\text{m}$) est utilisé dans l'industrie de la construction pour le jointoiment des carrelages et la finition des murs. Enfin, les billes de verre sont largement utilisées pour décrire la physique des écoulements granulaires et les billes choisies (Spherglass® 3000-E, Potters® Industries LLC, $d_{50} = 24 \mu\text{m}$) sont habituellement utilisées comme produit de saupoudrage des peintures pour le



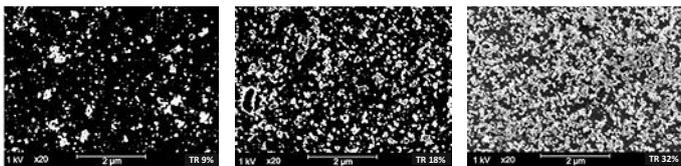


↑ FIGURE 2 Images par microscopie en transmission (TEM) des nanoparticules de silice utilisées en tant qu'additifs.

ENCADRÉ

LE TAUX DE RECOUVREMENT (TR)

Le TR est défini comme la fraction de surface de la particule hôte occupée par les NPs-SC, ces dernières restant généralement sous la forme d'agrégats. Le TR est estimé à l'aide d'images MEB des mélanges (Cf. Figure E1) qui sont exploitées par un logiciel d'analyse d'images - par exemple ImageJ - afin de déterminer la taille des agrégats et le TR surfacique. Pour tenir compte de la structure des agrégats et de leur arrangement, un TR de 40 % est considéré comme la valeur maximale de recouvrement de la surface de la particule hôte par les NPs-SC.



↑ FIGURE E1 Exemples de taux de recouvrement estimés à 9, 18 et 32 %.

marquage de sécurité des routes. Ces particules seront donc considérées comme les particules hôtes lors du mélange avec les additifs.

Plusieurs types de nanoparticules de silice Evonik ont été ajoutés : deux NPs-SC hydrophobes, Sipernat® D10 et Aerosil® R972, deux NPs-SC hydrophiles, Sipernat® 500LS et Aerosil® 300. Leur visualisation par microscopie (Cf. Figure 2) montre qu'elles forment des agrégats à l'état brut, mais cela ne préfigure pas de leur structure lorsqu'elles sont ajoutées aux particules hôtes.

Les propriétés d'écoulement ont été évaluées en déterminant le rapport d'Hausner et en utilisant une cellule de cisaillement. Les résultats corroborent l'hypothèse que le mécanisme d'action des additifs est lié à la manière dont les nanoparticules se répartissent à la surface de la poudre hôte, réduisant ainsi les forces interparticulaires [9].



↑ FIGURE 3 Visualisations des poudres et des mélanges poudres – additifs utilisés pour estimer les propriétés d'écoulement. La première colonne présente les particules hôtes pures, les colonnes suivantes présentent les mélanges avec des teneurs massiques (% m/m) variables en additifs, le taux de recouvrement (TR) ayant été estimé par imagerie. Ligne 1 : Avicel® PH102 ; ligne 2 : joint fin (MAPEI®) ; ligne 3 : farine de blé ; ligne 4 : billes de verre.

Les résultats ont démontré qu'il n'y a pas de quantité standard d'additif à ajouter pour améliorer la coulabilité, la quantité requise dépend du matériau hôte et de l'additif. En effet, les échantillons qui s'écoulent moins bien ont besoin d'un plus grand taux de recouvrement (TR, Cf. Encadré) que ceux qui présentent un meilleur comportement d'écoulement (Cf. Figure 3). Pour les essais conduits, il a été estimé qu'un taux de recouvrement de 40 % de la surface des particules hôtes par les NPs-SC était suffisant pour améliorer la coulabilité de manière significative. Les mélanges présentés sur la Figure 3 permettent d'illustrer les effets conjoints de la nature des additifs et de la quantité ajoutée, le pouvoir régulateur d'écoulement d'un additif dépend de sa nature, de la quantité ajoutée, mais aussi de la nature de la poudre hôte. Une étude par microscopie de l'état de surface des particules hôtes après mélange avec les additifs montre que les quatre NPs-SC étudiées se présentent sous la forme d'agrégats d'une taille généralement comprise entre 35 et 60 nm et de formes hétérogènes. Il a été constaté que, lorsque l'additif reste sous la forme de grands agrégats (> 1 µm), comme c'est le cas avec le Sipernat 500LS, le TR est faible

et les propriétés de coulabilité sont peu modifiées. L'ajout d'additifs hydrophobes (Sipernat D10 et Aerosil R972) a augmenté la coulabilité dans toutes les configurations étudiées [10]. Ces observations, faites sur un nombre restreint de matériaux, ne permettent cependant pas de proposer des conclusions générales et universelles sur les mécanismes d'action des additifs NPs-SC considéré. Néanmoins, la réflexion s'oriente sur la prise en compte de la force de la liaison entre particule hôte et NPs-SC. Ainsi, il est constaté que les NPs-SC hydrophobes améliorent la coulabilité de manière plus significative que les NPs-SC hydrophiles, indépendamment de l'affinité pour l'eau de la poudre hôte.

Ceci peut être lié à la faiblesse des forces entre les nanoparticules hydrophobes. En effet, le traitement chimique utilisé pour produire des NP hydrophobes diminue le nombre de liaisons hydrogène, les agrégats/agglomérats ayant alors des forces de liaison plus faibles. Ils peuvent ainsi se désagglomérer plus facilement et mieux se répartir sur la particule hôte.

D'autres résultats ont montré que le changement d'humidité a une influence très significative sur la coulabilité des poudres mais que, lorsque des NPs-SC sont ajoutées, l'humidité a moins d'influence et que ceci est indépendant de l'affinité des NPs-SC avec l'eau. Cette différence de comportement suggère que l'ajout de NPs-SC modifie l'énergie de surface des particules hôtes [10].

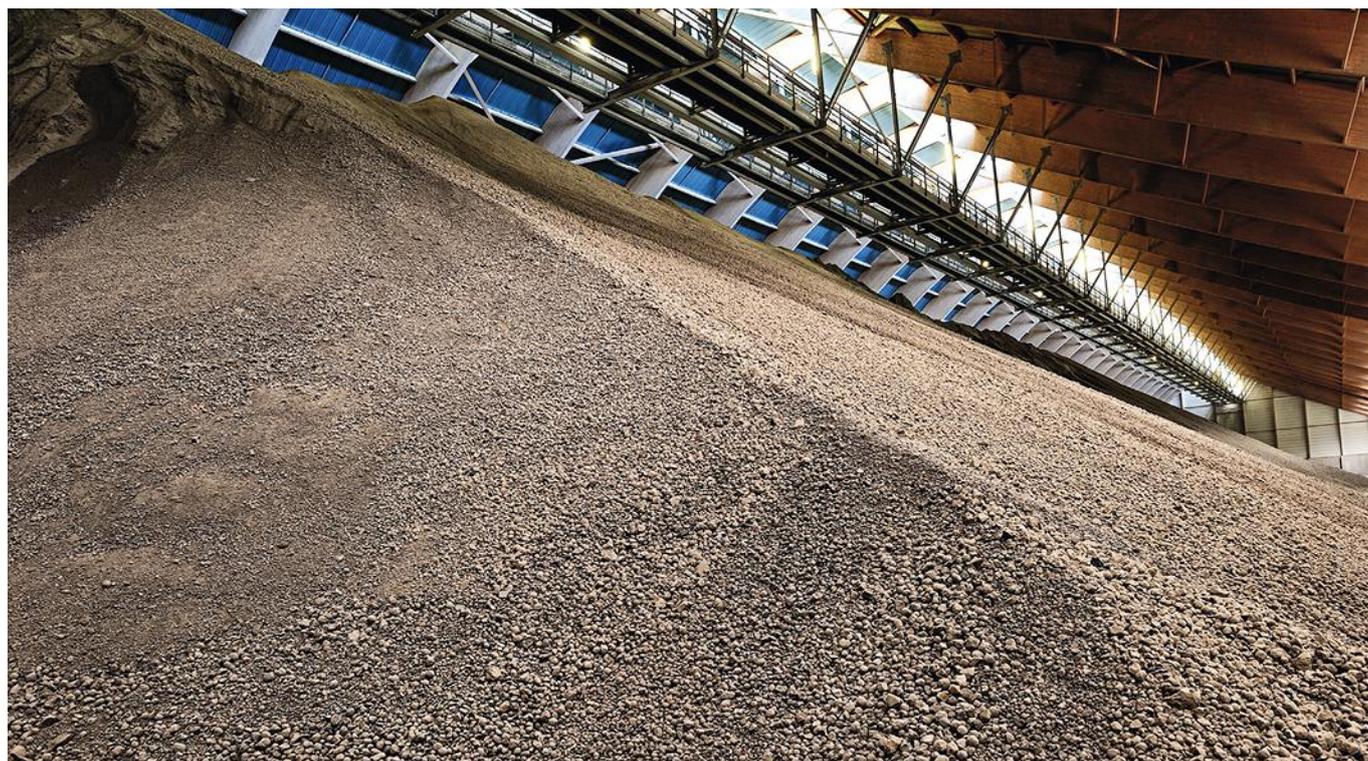
Effet des nano-additifs sur l'empoussièrement

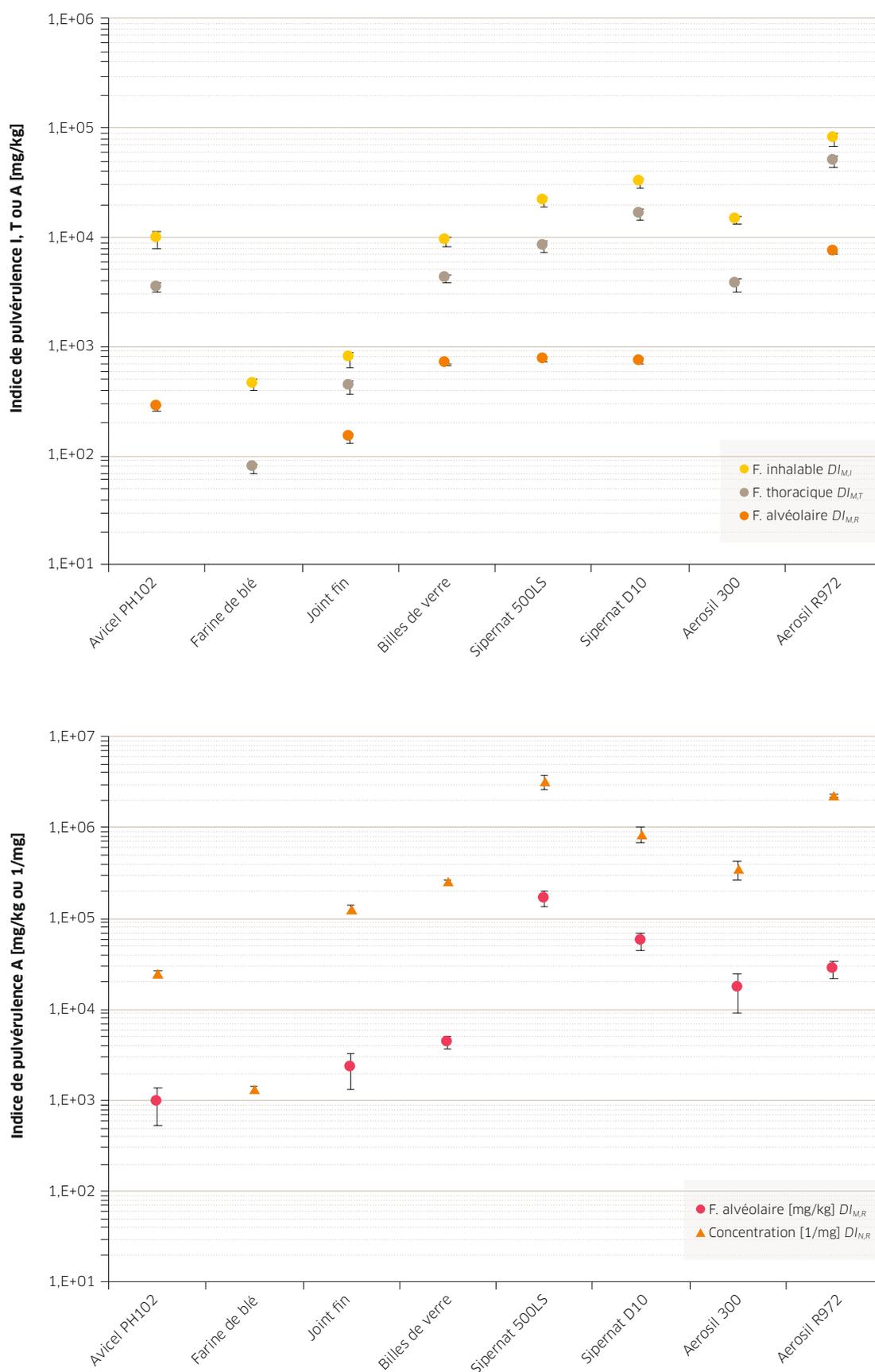
Les mesures de pulvérulence ont été réalisées à l'aide des deux techniques, le tambour rotatif et le *vortex shaker*. Ces méthodes fournissent les quantités de poussières émises sous des contraintes mécaniques différentes, comme expliqué dans l'article précédent (Cf. pp. 29-36).

Les indices de pulvérulence des poudres et des additifs pris séparément sont présentés sur la Figure 4 pour les deux techniques de mesure.

Si le tambour rotatif est utilisé, l'Avicel PH102 et les billes de verre se classent dans la catégorie « élevée », pour les trois fractions : inhalable, thoracique et alvéolaire. La farine de blé est la poudre qui génère le moins de poussière, elle est classée comme « faible » dans la fraction inhalable, « très faible » dans la fraction thoracique, tandis que la fraction respirable est « inférieure à la limite de quantification ». Enfin, les indices de pulvérulence du joint fin sont tous à un niveau « modéré », même s'il semble être le produit le plus poussiéreux lors de sa manipulation. Concernant les NPs-SC étudiées seules, la fraction inhalable est toujours plus élevée que celle mesurée pour les poudres. Il faut également remarquer que les indices des deux additifs hydrophobes sont plus élevés que ceux des additifs hydrophiles, ce qui s'explique probablement par une diminution des liaisons hydrogène, des forces de cohésion plus faibles, et donc une mise en suspension accrue.

Avec la méthode du *vortex shaker*, les valeurs de fraction alvéolaire ($DI_{M,R}$) sont plus élevées que





↑ FIGURE 4 Indices de pulvéulence pour les poudres et les additifs selon les deux techniques de mesure. En haut, le tambour rotatif avec les indices massiques des fractions inhalable $DI_{M,I}$, thoracique $DI_{M,T}$ et alvéolaire $DI_{M,R}$. En bas, le vortex shaker avec l'indice $DI_{M,R}$ et l'indice de pulvéulence en nombre $DI_{N,R}$.

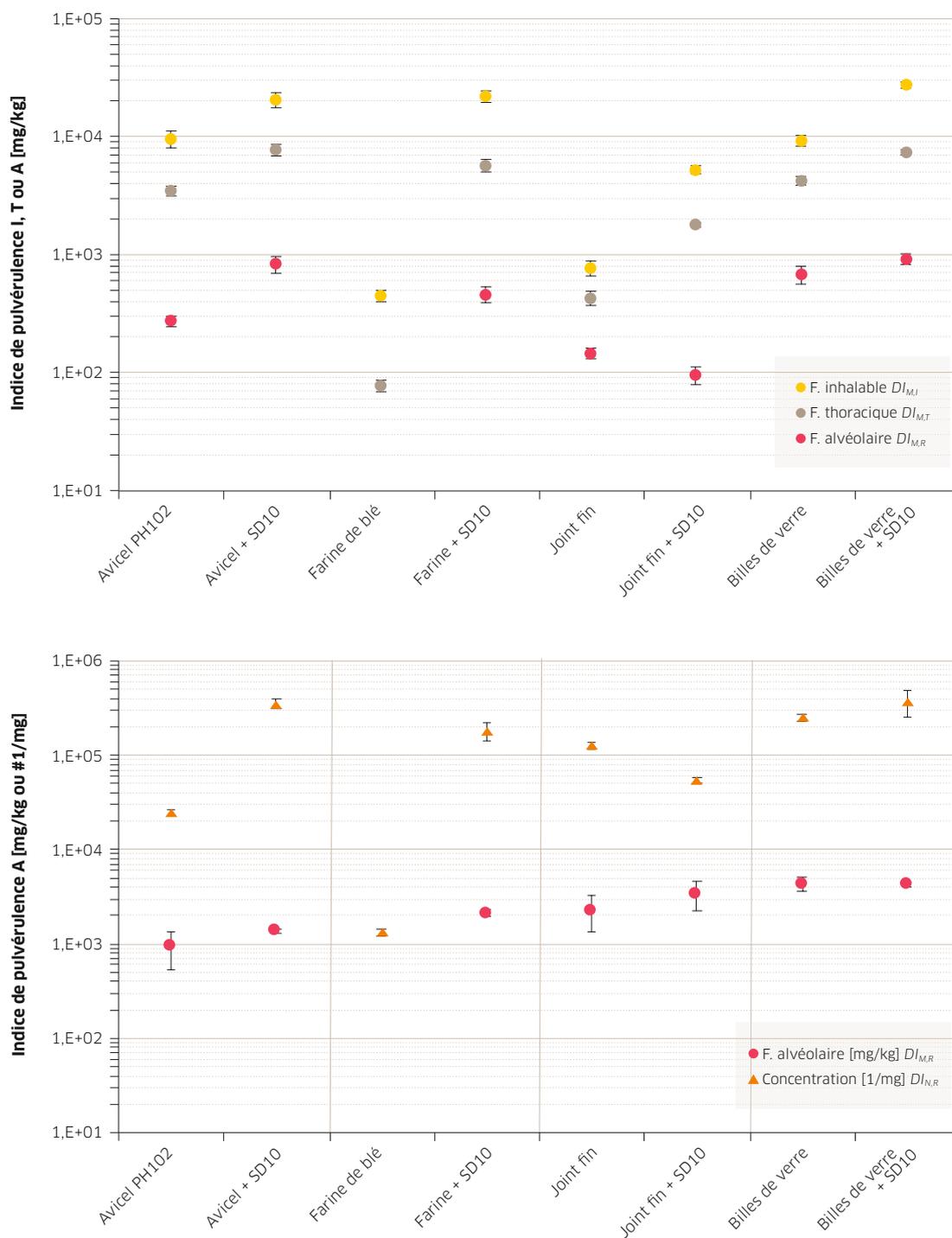


FIGURE 5
Indices de pulvéulence pour les poudres recouvertes de 40 % de Sipernat D10 selon les deux méthodes de mesure. En haut, le tambour rotatif avec les indices $DI_{M,I}$, $DI_{M,T}$, et $DI_{M,R}$. En bas, le vortex shaker avec l'indice de pulvéulence $DI_{M,R}$ et l'indice de pulvéulence en nombre $DI_{N,R}$.

celles obtenues avec le tambour rotatif. Les produits les plus poussiéreux sont les billes de verre, suivies du joint fin, ce qui correspond aux particules de plus petites tailles. Pour les additifs, la fraction alvéolaire $DI_{M,R}$ est au moins deux fois plus grande que pour toutes les poudres étudiées. Pour expliquer les différences entre les valeurs de $DI_{M,R}$ obtenues par les deux méthodes, il faut remarquer que l'énergie transmise à l'échantillon, qui permet de vaincre les forces interparticulaires sources de cohésion, est plus importante dans le

cas du *vortex shaker*, ce qui conduit donc à une émission d'une plus grande quantité de matière. Les forces interparticulaires, variant en fonction du matériau, sont délicates à estimer et il est proposé de déterminer la cohésion du lit à partir d'expériences de rupture plastique [10]. Afin d'évaluer l'effet de l'amélioration de la coulabilité sur la pulvéulence, des mélanges de poudres hôtes ont été réalisés avec la quantité de NPs de Sipernat D10 (SD10) correspondant à un taux de recouvrement de 40 %, taux qui permet d'améliorer



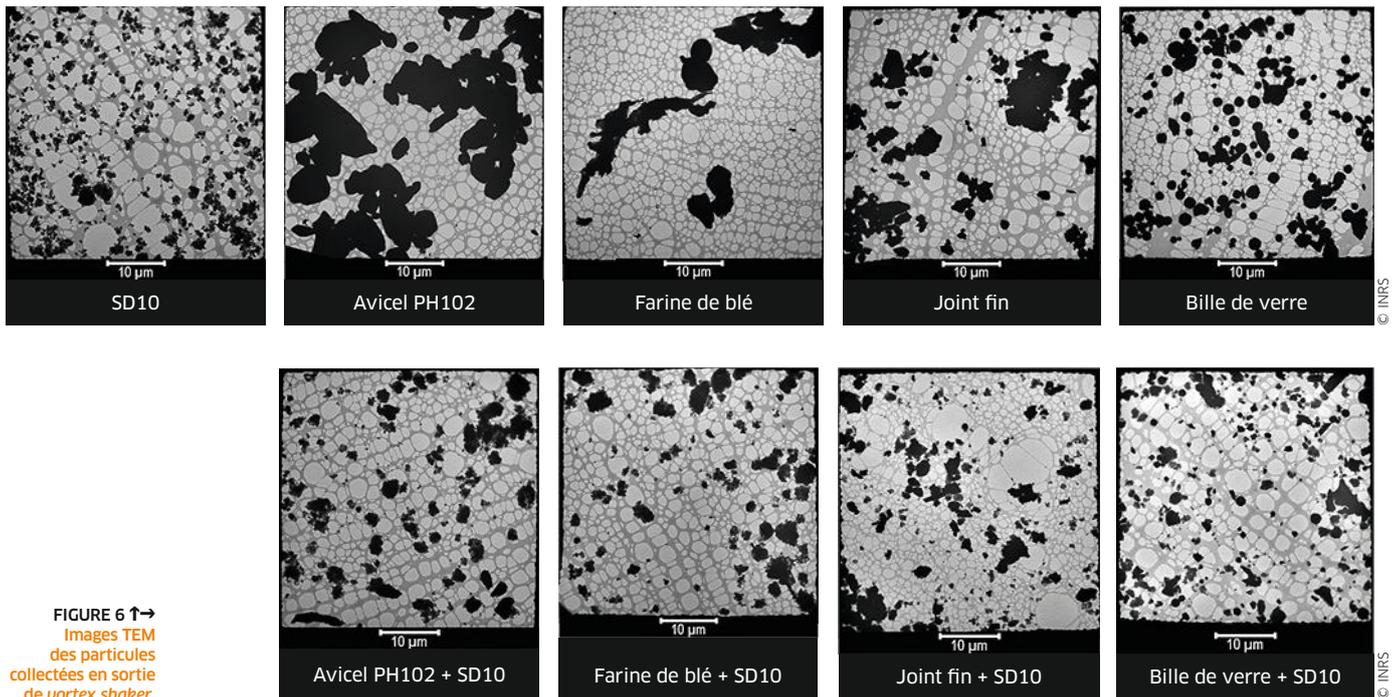


FIGURE 6 ↑→
Images TEM
des particules
collectées en sortie
de vortex shaker.

les propriétés d'écoulement de toutes les poudres. La Figure 5 compare les indices de pulvérisation sans et avec SD10. Les mesures réalisées en tambour rotatif montrent que les indices augmentent avec l'ajout de SD10 pour atteindre les valeurs obtenues avec l'additif seul, sauf pour le joint fin. En revanche, la méthode du vortex shaker ne montre pas de modification de l'indice $DI_{M,R}$ avec l'ajout de SD10, sauf pour la farine.

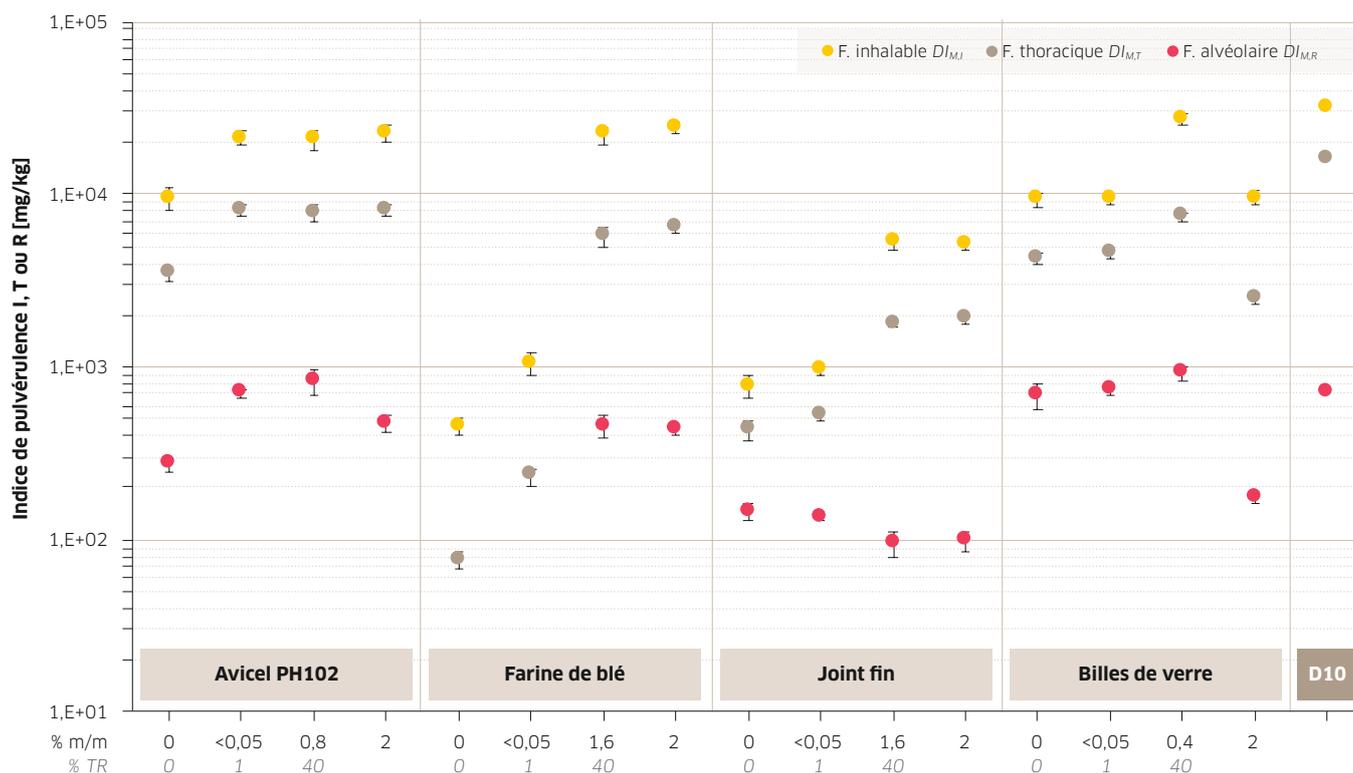
L'ensemble de ces résultats suggère que l'ajout de NPs réduit les forces interparticulaires entre les particules hôtes, ce qui augmente la dispersion, entraînant une augmentation du nombre de particules en suspension dans l'air, principalement les plus légères. La pulvérisation dépend à la fois de l'énergie fournie à l'échantillon par le dispositif mais également des interactions interparticulaires, de la taille et de la densité des poudres. Ainsi, les formulations de poudre contenant des NPs-SC semblent générer plus de poussières, augmentant le potentiel d'exposition par inhalation et générant également un risque accru d'explosion. La Figure 6 illustre la poussière produite par la méthode vortex shaker qui est collectée directement en sortie sur des grilles pour TEM. L'Avicel PH102 sans additif présente des clusters de particules non individualisées. La farine émet quelques particules de différentes formes. Le joint fin et les billes de verre produisent une poussière similaire avec quelques clusters. Les micrographies de Sipernat D10 montrent des nanoagrégats de différentes tailles bien répartis.

Lorsque les poudres hôtes sont mélangées à du Sipernat D10 (Cf. Figure 6, ligne 2), les particules recueillies sont mieux dispersées sur la grille TEM, se présentant sous la forme de particules nanométriques isolées ou de petits agrégats. Les poussières semblent similaires pour les quatre poudres hôtes et sont plus fines, avec des diamètres inférieurs à 5 µm, ce qui implique qu'elles pénètrent plus loin dans le système respiratoire. Ceci suggère que les niveaux élevés de pulvérisation, similaires à ceux du Sipernat D10 seul, observés pour les mélanges sont dus au détachement d'une partie des NPs de la surface des particules hôtes pendant l'aérosolisation, les additifs ajoutés sont donc ceux que l'on retrouve principalement dans les poussières.

Chercher un compromis

Améliorer la coulabilité des poudres tout en réduisant la production de poussière nécessite d'étudier simultanément ces deux propriétés d'usage. Ainsi, la coulabilité et la pulvérisation ont été évaluées en ajoutant respectivement la quantité de Sipernat D10 nécessaire pour recouvrir 1 % et 40 % (total) de la surface de la poudre hôte, ainsi qu'une quantité de 2 % en masse (Cf. Figure 7), représentant une valeur classiquement utilisée en formulation.

Les poudres initiales choisies ont des coulabilités variables, l'effet de l'ajout de SD10 est donc différent d'une poudre à l'autre. L'Avicel PH102, qui est une poudre qui s'écoule bien même sans additif, voit sa pulvérisation augmenter mais rester sta-



↑ FIGURE 7 Indices de pulvéulence DI_{MJ} , DI_{MT} , DI_{MR} en tambour tournant pour les poudres et pour les mélanges avec Sipernat SD10 à différentes proportions : taux de recouvrement de 1 % (< 0,05 % m/m) ; taux de recouvrement de 40 % (0,4 à 1,6 % m/m) et teneur massique de 2 % m/m.

tionnaire quelle que soit la quantité de D10 ajoutée. Les indices de pulvéulence sont proches de ceux du SD10 pur. Cette poudre n'a probablement pas besoin d'additif et c'est ce dernier qui est relâché dans la poussière.

La farine de blé est une poudre qui ne s'écoule pas très bien, l'ajout de SD10 permet d'améliorer la coulabilité. La coulabilité n'est pas améliorée à 1 % de taux de recouvrement, tandis qu'elle l'est significativement à 40 %. Ceci signifie que la bonne quantité de D10 pour améliorer la coulabilité doit se situer dans cet intervalle. Les indices d'empoussièrement montrent une évolution importante entre les taux de recouvrement de 1 % et 40 %. Ce dernier, proche du taux du SD10 seul, suggère un détachement des nano-agrégats de la surface de la particule hôte. L'optimum est donc à rechercher entre 1 et 40 % de taux de recouvrement pour réduire la quantité de poussières.

Dans le cas du joint fin, un taux de recouvrement de 1 % est suffisant pour obtenir une coulabilité satisfaisante et, dans ce cas, les indices de pulvéulence restent semblables à ceux de la poudre initiale.

Pour les billes de verre, qui sont une poudre avec une bonne coulabilité, ajouter de faibles quantités de nanoparticules SD10 augmente les indices de pulvéulence, mais l'ajout d'une quantité plus importante abaisse les fractions thoraciques et

alvéolaires, ce qui est probablement lié au niveau d'agrégation de ces additifs.

Ces résultats montrent que la bonne quantité de NPs à ajouter varie en fonction de la poudre. Il n'existe pas de quantité standard à ajouter ; il convient donc de rechercher la quantité juste nécessaire, car, utilisés en excès, les additifs génèrent une augmentation de la pulvéulence.

Conclusions et recommandations

Afin de prévenir les risques d'exposition des opérateurs, une des stratégies à adopter de manière prioritaire dans le cadre de l'utilisation des NPs-SC en tant qu'agents d'écoulement est donc de les réduire, les éviter ou les substituer. Pour les réduire, la connaissance des indices de pulvéulence des matériaux constitue une vraie clé. Il est suggéré d'utiliser les indices de pulvéulence des matériaux comme une propriété d'usage. Ainsi, associer les deux propriétés d'usage, coulabilité et empoussièrement, permettrait de garantir la faisabilité du procédé qui est liée à la coulabilité, tout en réduisant les risques d'exposition aux poussières mais aussi aux nanopoussières et en limitant les risques d'explosion. D'un point de vue pratique, il est proposé de :

- choisir comme agent d'écoulement des NPs-SC hydrophobes de faible taille, telles que Sipernat D10 ou Aerosil R972 ;





© Gael Kerbaud / INRS / 2019

- quantifier l'aptitude à s'écouler des poudres et mélanges de poudres avec des techniques qui simulent au mieux les conditions mécaniques mises en œuvre lors du procédé (Cf. pp. 29-36) ;
 - commencer par ajouter une faible quantité de NPs-SC hydrophobes (par exemple 0,1 % m/m) pour des poudres qui s'écoulent assez bien mais pour lesquelles une amélioration est souhaitée, ou une quantité plus importante (par exemple 0,5 % m/m) pour des poudres très cohésives pour lesquelles une nette amélioration de la coulabilité est nécessaire. Un protocole basé sur le taux de recouvrement des particules hôtes permettrait de cerner de manière plus fine les quantités à ajouter en visant un taux de recouvrement maximal de 40 % pour les poudres présentant un écoulement difficile. Une proposition du protocole est disponible dans l'article [9] ;
 - quantifier l'empoussièrement de la poudre dans des conditions d'humidité proches des conditions environnementales du procédé. ●
1. EFSA : Autorité européenne de sécurité des aliments. Voir : <https://www.efsa.europa.eu/fr>

BIBLIOGRAPHIE

- [1] JOURNAL OFFICIEL – Arrêté du 26 septembre 2017 modifiant l'arrêté du 19 octobre 2006 relatif à l'emploi d'auxiliaires technologiques dans la fabrication de certaines denrées alimentaires. Accessible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFARTIO00035742835>
- [2] DIRECTION GÉNÉRALE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES – Éléments issus des déclarations des substances à l'état nanoparticulaire. Rapport d'étude, 2019. Accessible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Rapport%20R-nano%202019.pdf>
- [3] JIMÉNEZ-GARAVITO M.C. ET AL. – The effect of silica nanoparticles on the dustiness of industrial powders. Accessible sur : DOI: 10.13140/RG.2.2.22228.48008
- [4] COWHERD C. ET AL. – An apparatus and methodology for predicting the dustiness of materials. *American industrial hygiene association (AIHA) Journal*, 1989, 50 (3), pp. 123-130.
- [5] PLINKE M.E.E. ET AL. – Dust generation from handling powders in industry. *American industrial hygiene association (AIHA) Journal*, 1995, 56, pp. 251-257.
- [6] GÖRNER P. ET AL. – Validation d'une méthode de mesurage de la pulvérulence des poudres en fractions conventionnelles d'aérosol. INRS, 2015, coll. Notes scientifiques et techniques NS 332, 41 p. Accessible sur : www.inrs.fr
- [7] LOPEZ-LILAO A. ET AL. – Particle size distribution: a key factor in estimating powder dustiness. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2017, 14, pp. 975-985.
- [8] GROOS-GERARDIN K. ET AL. – Combining product engineering and inherent safety to improve the powder impregnation process. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2015, 38, pp. 1-10. Accessible sur : DOI: 10.1016/j.jlp.2015.08.001
- [9] JIMÉNEZ-GARAVITO M.C. ET AL. – Silica nanoparticles as glidants for industrial processing: a statistical approach. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2022, 61, pp. 16517-16528.
- [10] CARES-PACHECO M.G., FALK V. – A phenomenological law for complex granular materials from Mohr-Coulomb theory. *Advanced powder technology*, 2023, 34, p. 103888.

DÉCOUPE DE BORDURES DE TROTTOIR À SEC ET À L'HUMIDE : EXPOSITION À LA SILICE CRISTALLINE

Les procédés de travail utilisés dans le secteur de la construction et notamment de la construction spécialisée (maçonnerie, charpente, couverture...) peuvent être à l'origine d'expositions professionnelles à la poussière de silice cristalline, à des niveaux pouvant dépasser la VLEP. Cet article présente les résultats de mesures d'exposition réalisées en situation réelle de travail lors de la découpe de bordures de trottoir. Ils soulignent l'intérêt du travail à l'humide pour limiter, à la source, l'émission de poussières par rapport au travail à sec, et ainsi diminuer l'exposition des opérateurs.

DAVY ROUSSET, NAÏMA GAUDEL
INRS,
département
Métrologie
des polluants

DENIS BÉMER
INRS,
département
Ingénierie des
procédés

CATHERINE HÉDOUIN-LANGLLET
Cramif,
Laboratoire
de toxicologie
industrielle

Les travaux exposant à la poussière de silice cristalline alvéolaire issue de procédés de travail ont été ajoutés à la liste des procédés cancérogènes par la directive UE n° 2017/2398, transposée en droit français par l'arrêté du 26 octobre 2020, en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2021 [1]. Des études récentes ont démontré que les travailleurs exposés sont majoritairement des hommes travaillant dans le secteur de la construction, avec des niveaux d'exposition importants pouvant dépasser fréquemment les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) actuelles [2-3]. En 2017, 64 % des personnes exposées professionnellement à la silice travaillaient dans le secteur de la construction, dont 34 % dans le secteur des travaux de construction spécialisés (maçonnerie, charpente, couverture...) [3]. Parmi les métiers pour lesquels les niveaux d'exposition dépassent le plus fréquemment la valeur limite actuelle, sont notamment retrouvés les métiers de finisseur (génie civil), maçon-monteur industriel (construction), palettiseur (fabrication d'éléments en béton), tailleur de pierre-marbrier (taille de pierres) [2]. Ces opérations nécessitent l'emploi d'outils susceptibles de produire de grandes quantités de poussières pouvant contenir de la silice cristalline en fonction de la nature du matériau, et ainsi induire une exposition des travailleurs importante en l'absence de moyens de protection ou de réduction des émissions. En atelier, il est possible de mettre en place des moyens efficaces de limitation des expositions à ces poussières, comme le recours aux cabines

ventilées, tables aspirantes, aspiration à la source, etc. [4-5]. Le travail à l'humide et l'abattage humide des poussières permettent également de réduire très significativement les émissions. Ces solutions sont beaucoup plus difficiles à mettre en œuvre pour les opérations sur le terrain, comme les chantiers de travaux publics ou de restauration de bâtiments. En particulier, les systèmes d'aspiration/filtration éventuellement utilisés pour le travail sur chantiers fonctionnent souvent sur batterie, ce qui limite leur puissance, et donc leur performance. La réduction des empoussièrtements par le travail à l'humide est ainsi souvent préconisée en l'absence de moyens de protection collective efficaces [6].

Abattage humide et travail à l'humide

Le travail à l'humide consiste en l'arrosage de la zone de travail du matériau (découpe, perçage, ponçage...), qui a pour effet de limiter l'envol des poussières en augmentant considérablement la cohésion des particules par les forces capillaires, favorisant la formation de boue plutôt que d'aérosol. L'efficacité du procédé va dépendre de la porosité du matériau, mais un facteur de réduction par 100 des émissions en nombre de particules peut être obtenu par rapport au procédé à sec [7]. L'abattage humide ne repose pas sur les mêmes mécanismes que l'arrosage. Il consiste à mettre en contact des gouttes d'eau, de diamètre compris entre 100 et 500 µm, avec les poussières émises, afin de les collecter et les éliminer par sédimentation (les gouttes chargées de poussière retombent au sol). Selon les conditions de mise en œuvre, l'abattage humide peut avoir une





© Vincent Nguyen pour l'INRS / 2023

Entreprise de démolition utilisant un robot hydraulique pour la découpe du béton.

double action, reposant sur la collecte des poussières par contact avec le brouillard d'eau, mais aussi de réduction des émissions par humidification des matériaux. Toutefois, une récente étude de l'INRS a montré que ce procédé n'était pas efficace pour les particules submicroniques [8]. De plus, plusieurs freins à sa mise en œuvre sur le terrain peuvent être identifiés, par exemple le besoin d'un apport régulier en eau, l'augmentation du risque de chute ou d'électrocution, la réduction de la visibilité de l'opérateur au niveau de la zone de travail à cause de la formation de boue, la remise en suspension de la boue une fois sèche, etc.

Mesures d'exposition effectuées sur le terrain

Cet article présente les conclusions de mesures d'exposition effectuées en situation réelle de travail, lors de la découpe de bordures de trottoir, en vue de déterminer l'intérêt du travail à l'humide pour limiter à la source l'émission de poussières par rapport au travail à sec, et ainsi diminuer l'exposition des opérateurs. L'analyse de la bordure a confirmé la présence majoritaire de silice cristalline (64 %) associée à de la calcite. La découpe des bordures à sec et à

l'humide a été réalisée à l'aide d'une scie circulaire thermique Stihl (modèle TS 420) équipée d'un disque diamant Götz (LBA 66) de 300 mm de diamètre. Lors de la découpe à l'humide, un réservoir d'eau sous pression manuelle connecté à la scie circulaire et actionné par un second salarié a été utilisé.

Des prélèvements atmosphériques et des mesures en temps réel au niveau des voies respiratoires de l'opérateur et en ambiance de travail, en champs proche et lointain, ont été effectués durant la réalisation de traits de découpe successifs dans les bordures. L'opérateur était équipé d'un dispositif de prélèvement de la fraction alvéolaire (cyclone Dorr-Oliver) pour la détermination de la concentration en poussières et silice cristalline alvéolaires et d'un impacteur en cascade (Sioutas 4 étages plus filtre terminal) pour la détermination de la distribution granulométrique en masse. L'analyse en temps réel de la concentration et de la distribution en nombre a été réalisée en poste fixe à l'aide d'un APS (*Aerodynamic Particle Sizer*) pour les diamètres aérodynamiques (d_{ae})¹ compris entre 0,5 et 20 μm et d'un ELPI+ (*Electrical Low Pressure Impactor*) pour les d_{ae} compris entre 0,006 et 9,90 μm . Des prélèvements sur grille de microscopie électronique en transmission à l'aide d'un MPS (*Mini Particle Sampler*) ont été effectués au niveau des voies respiratoires de l'opérateur, ainsi qu'en poste fixe en aval d'un cyclone SCCO.732 pour sélectionner spécifiquement la fraction de $d_{ae} < 1 \mu\text{m}$ (PM1).

NB : Du fait des conditions environnementales et du caractère unidirectionnel de l'émission des poussières, les dispositifs en poste fixe (APS, ELPI+, cyclone PM1) se situaient dans le panache lors d'une partie de la découpe à sec, mais à l'opposé du panache lors de la découpe à l'humide. Les résultats issus de ces prélèvements doivent ainsi être considérés comme qualitatifs. Pour une approche quantitative, le déploiement d'un système de captage pour confiner la source des aérosols et s'affranchir des fluctuations à l'émission aurait été nécessaire.

Résultats

Concentration massique en fraction alvéolaire

La concentration en poussières alvéolaires mesurée au niveau des voies respiratoires de l'opérateur est importante, lors de l'activité de découpe des bordures en l'absence d'arrosage et peut atteindre plus de 2 mg/m^3 . Lors de la découpe à l'humide, la concentration en poussières alvéolaires au niveau des voies respiratoires de l'opérateur diminue d'un facteur 4,4 (Cf. Figure 1). Les mêmes observations peuvent être réalisées pour la silice cristalline alvéolaire : la découpe à l'humide permet de réduire le niveau d'exposition de l'opérateur d'un facteur 4,4 (Cf. Figure 1). Cependant, la VLEP-8h du quartz en fraction alvéolaire (0,1 mg/m^3) est largement dépassée dans les deux

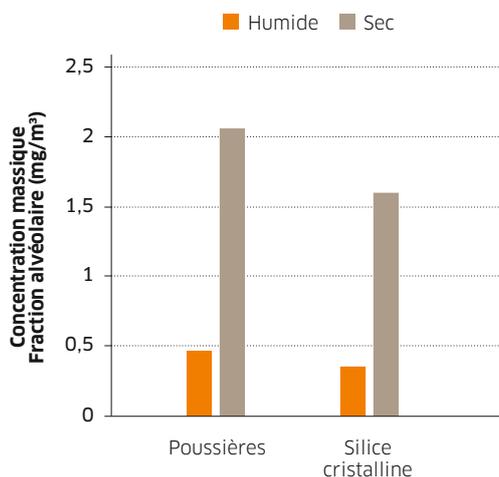
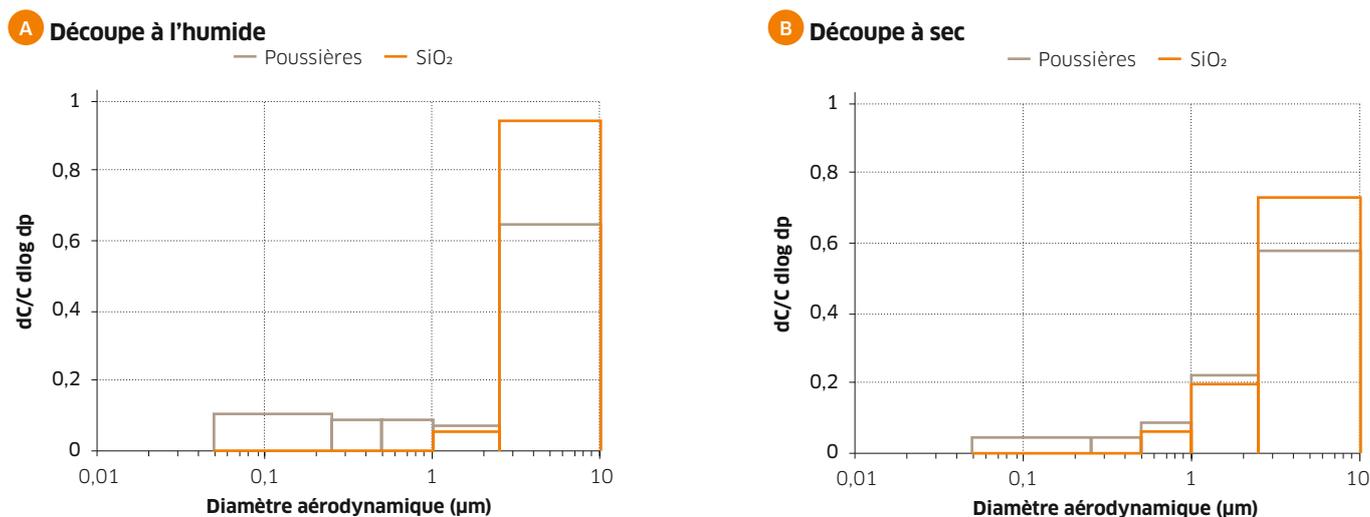
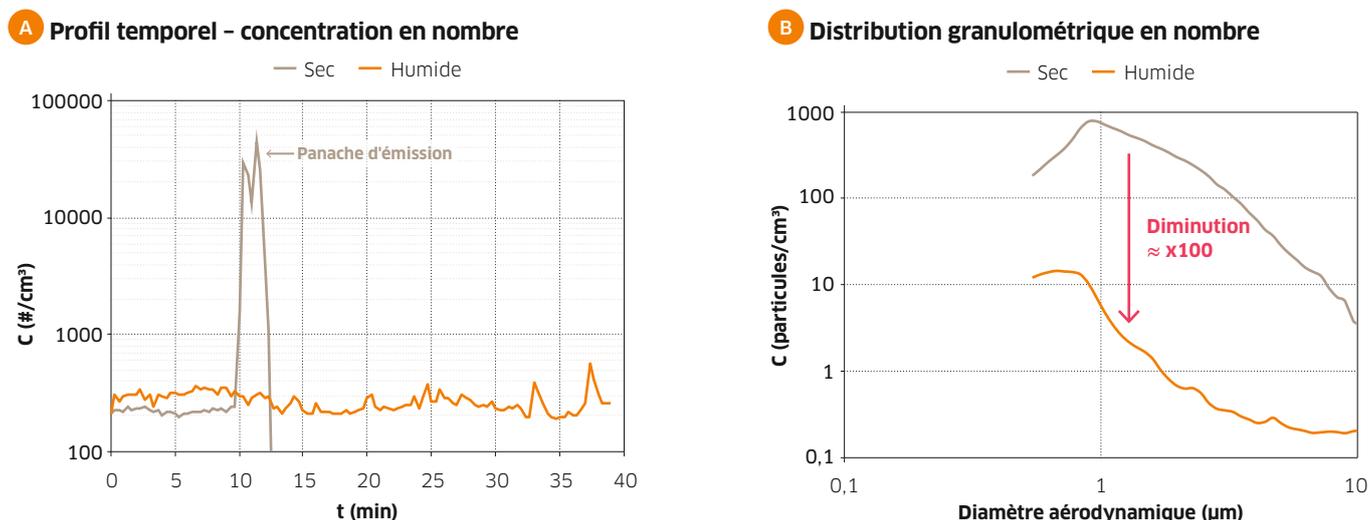


FIGURE 1 → Concentration pondérale en poussières alvéolaires et en silice cristalline alvéolaire au niveau des voies respiratoires de l'opérateur (prélèvement cyclone Dorr-Oliver).



↑ FIGURE 2 Distribution granulométrique en masse en poussières (Poussières) et en silice cristalline (SiO₂) au niveau de l'opérateur de découpe (prélèvement impacteur Sioutas). Par convention et pour une comparaison des distributions, les concentrations pour chaque étage sont normalisées à la concentration totale (dC/C) et à la taille de la classe granulométrique correspondante (dlog dp).



↑ FIGURE 3 (A) Évolution au cours du temps de la concentration en particules ($d_{ae} > 0,5 \mu\text{m}$) et (B) distribution granulométrique en nombre lors de la découpe de bordure à sec (en gris) et à l'humide (en orange) (Données APS).

cas, en particulier lors de la découpe à sec. La silice cristalline représente 77 % en moyenne des poussières alvéolaires au niveau de l'opérateur, que ce soit lors de la découpe à sec ou à l'humide.

Distribution granulométrique en masse

Pour les distributions en masse en poussières (Cf. Figure 2), les fractions grossières (particules de $d_{ae} > 1 \mu\text{m}$) représentent plus de 85 %, et la fraction la plus fine (particules de $d_{ae} < 0,25 \mu\text{m}$), entre 2 et 7 % lors de la découpe à sec. Lors de la découpe à l'humide, les fractions grossières représentent entre 55 % et 77 % de la distribution en masse et la fraction la plus fine, entre 13 % et 36 %. La découpe à l'humide semble donc générer un brouillard avec une proportion de particules ultrafines plus importantes. Des distributions similaires ont déjà été observées lors de la découpe de dalles de granit à l'humide.

Mesures en temps réel (APS, ELPI+)

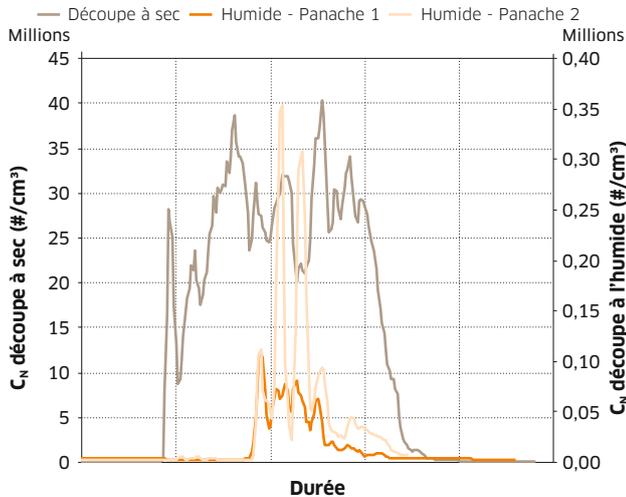
→ Données APS ($d_{ae} = 0,5 - 20 \mu\text{m}$)

NB : Les mesures APS donnent une information sur la concentration et la distribution granulométrique en nombre des **particules microniques uniquement**.

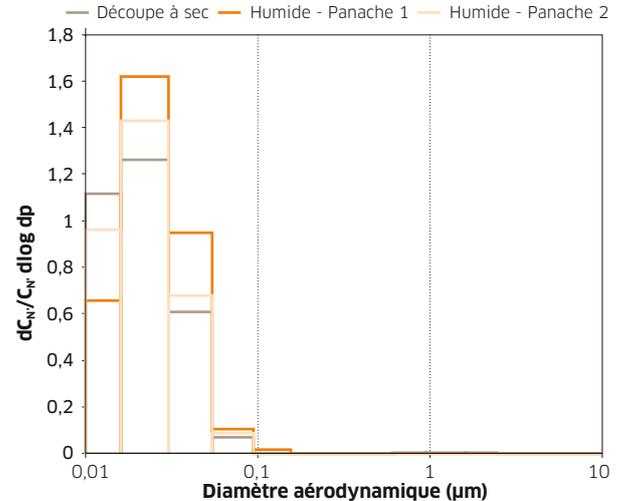
À l'instar des mesures en concentration pondérale, les mesures en temps réel avec l'APS montrent que la découpe à l'humide permet de réduire d'un facteur 100 la concentration en nombre de particules émises par rapport à la découpe à sec pour les particules microniques (Cf. Figure 3). La Figure 3A présente un exemple de suivi de la concentration en particules de $d_{ae} > 0,5 \mu\text{m}$ au cours du temps. La concentration mesurée « à sec » est très fluctuante du fait des conditions environnantes (vent changeant) et de la nature très directionnelle de l'émission de poussières. Les concentrations sont plus stables lors du travail à l'humide, du fait peut-être que l'émission est beaucoup plus diffuse (moins



A Profil temporel - concentration en nombre



B Distribution granulométrique en nombre



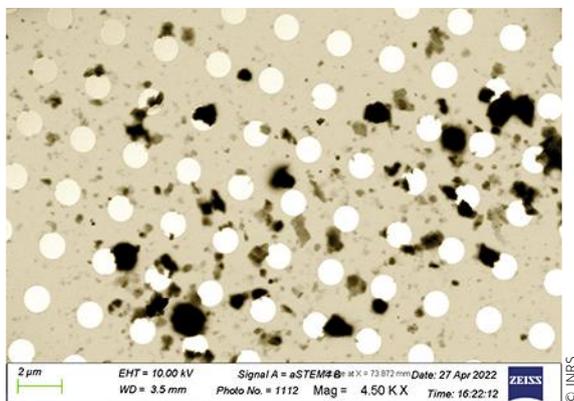
↑ FIGURE 4 (A) Profil temporel de la concentration et (B) distribution granulométrique en nombre (C_N) lors de la découpe de bordure à sec (échelle de gauche) et à l'humide (échelle de droite) (Données ELPI+). Dans le cas de la découpe à l'humide, l'analyse s'est focalisée sur 2 courts épisodes correspondant à 2 panaches de poussières émises en direction de l'appareil lors du tronçonnage. Par convention et pour une comparaison des distributions granulométriques (à droite), les concentrations pour chaque étage sont normalisées à la concentration totale (dC_N/C_N) et à la taille de la classe granulométrique correspondante ($dlog dp$).

directionnelle). La Figure 3B présente les distributions granulométriques en nombre établies pour les deux configurations sec/humide démontrant un abattement d'un facteur 100 environ sur quasiment l'intégralité du spectre granulométrique.

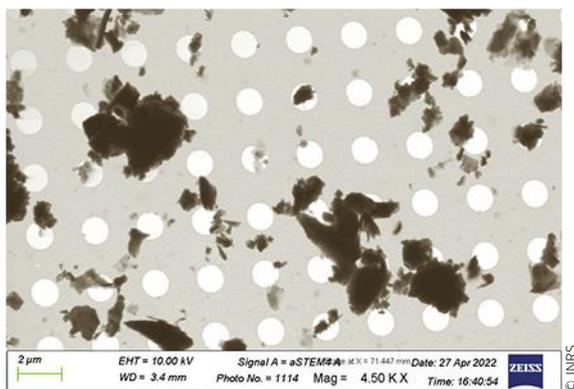
→ Données ELPI+ ($d_{ae} = 0,006 - 9,90 \mu m$)

NB : Les mesures ELPI+ donnent une information sur la concentration et la distribution granulométrique en nombre des **particules ultrafines nanométriques** et microniques.

Les données de temps réel avec l'ELPI+ ont été restreintes à la durée des panaches vus par l'instrument durant les découpes (notamment à l'humide). Ces données confirment que la découpe à l'humide permet de réduire d'un facteur 100 la concentration en nombre de particules émises par rapport à la découpe à sec (Cf. Figure 4), sachant que cette concentration est dominée par les particules ultrafines ($d_{ae} < 100 \text{ nm}$, Figure 4B). Il n'y a pas de différence significative de distribution granulométrique en nombre entre découpe à l'humide et découpe à sec, toujours dominée par la fraction $< 100 \text{ nm}$.



MPS Opérateur - Découpe à l'humide

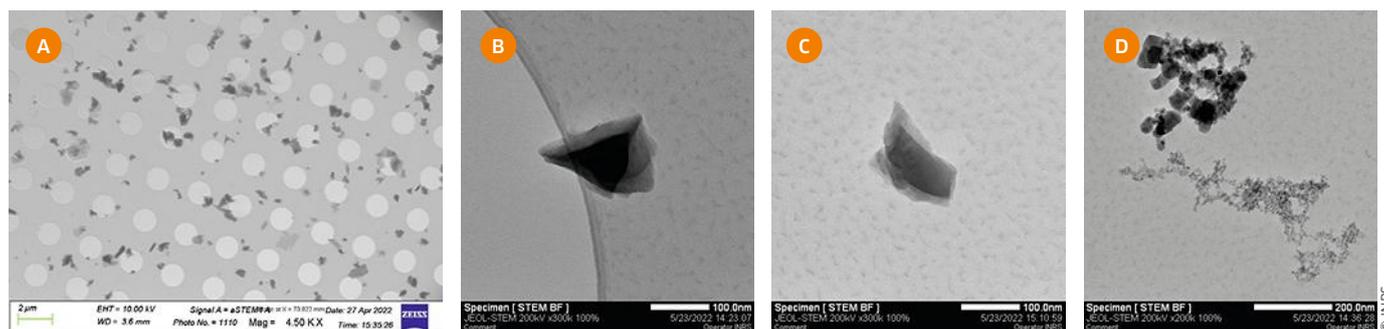


MPS Opérateur - Découpe à sec

FIGURE 5 → Morphologie des particules observées (prélèvement MPS opérateur). Observation au microscope électronique à balayage en mode électrons transmis.

Morphologie des particules

Les observations en microscopie électronique mettent en évidence la prédominance de grosses particules microniques dans l'aérosol au niveau de l'opérateur lors de la découpe à sec et à l'humide (Cf. Figure 5). Le prélèvement après cyclone PM1 permet d'améliorer qualitativement le niveau de chargement des supports de collecte pour l'observation au microscope électronique de particules plus fines, en éliminant les particules de $d_{ae} > 1 \mu m$ (Cf. Figure 6), même si une partie des particules fines est éliminée avec les particules grossières. La présence de particules de silice d'une centaine de nanomètres a pu être mise en évidence lors de la découpe à sec et à l'humide. La morphologie et la taille de ces particules sont identiques à celles observées pour d'autres chantiers suivis dans le cadre du projet Pure-Snow (Cf. Encadré). D'autres



↑ FIGURE 6 Morphologie des particules observées lors de la découpe à sec (prélèvement PM1 en poste fixe). (A) Observation au microscope électronique à balayage en mode électrons transmis. (B-D) Observation au microscope électronique en transmission à balayage. (A) Niveau de chargement en particules. (B-C) Nanoparticules de silice cristalline. (D) Autres nanoparticules observées (Fe, Mn, Cr, Si, Ni).

nanoparticules sont également présentes sur le prélèvement et peuvent être issues de moteurs thermiques à proximité et/ou de l'usure de l'outil pour les particules métalliques.

Conclusions

Malgré de nombreux biais expérimentaux liés à la configuration du chantier et à ce type d'analyse, cette étude de cas a permis de mettre en évidence l'intérêt du travail à l'humide qui permet de diminuer d'une manière significative les expositions des travailleurs durant les opérations de découpe

de bordure. Cependant, les niveaux d'exposition restent élevés, notamment vis-à-vis de la silice cristalline, pour cette opération en particulier, mais également pour de nombreuses tâches dans le BTP (découpe de tuiles et briques, ponçage de béton, découpe de dalles, etc.). Le travail à l'humide doit ainsi être complété par d'autres moyens de prévention permettant de réduire les expositions, tels que l'aspiration à la source, le capotage, ou encore le port d'équipements de protection individuelle en l'absence d'autres alternatives techniques. ●

1. Le diamètre aérodynamique d_{ae} d'une particule dans l'air est le diamètre d'une sphère de masse volumique 1 g/cm^3 de même vitesse de sédimentation dans l'air que la particule. Les particules de même d_{ae} auront ainsi le même comportement dans l'air quelles que soient leur forme, leur taille ou leur masse volumique.

ENCADRÉ

NIVEAUX D'EXPOSITION AUX POUSSIÈRES ALVÉOLAIRES ET À LA SILICE CRISTALLINE DANS LE BTP. RETOUR D'EXPÉRIENCE DU PROJET PURE-SNOW

L'un des objectifs du projet *Pure-Snow*¹ était d'améliorer les connaissances sur l'exposition des travailleurs aux poussières fines et ultrafines de silice cristalline dans le secteur du BTP à partir de campagnes de mesurages pour des activités variées (découpe, ponçage, projection...) mettant en œuvre différents types de matériaux (béton, brique, tuile, granit). Dans le cadre de cette campagne, le Laboratoire de toxicologie industrielle de la Caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France (Cramif) a notamment réalisé des prélèvements de la fraction alvéolaire des aérosols sur opérateur pour déterminer les niveaux d'exposition aux poussières et à la silice cristalline lors de ces opérations. Les résultats ont permis de mettre en évidence des niveaux d'exposition individuelle très élevés : 65 % des mesures dépassent ainsi la VLEP-8h de $0,9 \text{ mg/m}^3$ pour les poussières alvéolaires (maximum de $7,4 \text{ mg/m}^3$) et 55 % la VLEP-8h de $0,1 \text{ mg/m}^3$ du quartz (maximum de $1,6 \text{ mg/m}^3$). Les concentrations les plus importantes ont été mesurées principalement lors d'opérations à sec, sans aspiration et mettant en œuvre des procédés à haute énergie (découpe, ponçage), quel que soit le matériau. Ces résultats démontrent la nécessité de mettre en œuvre de manière systématique tous les moyens de prévention permettant de réduire au maximum les niveaux d'exposition aux poussières et à la silice cristalline des opérateurs du BTP.

1. ANDUJAR P. – L'exposition des travailleurs du BTP à des nanoparticules de silice : remodelage pulmonaire après exposition. *Les Cahiers de la recherche – Air et santé*, 2019, 14, pp. 40-41.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ARRÊTÉ DU 26 OCTOBRE 2020 fixant la liste des substances, mélanges et procédés cancérigènes au sens du Code du travail et transposant la directive UE n° 2017/2398. Accessible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042483502>
- [2] ANSES – Dangers, expositions et risques relatifs à la silice cristalline. 2019, 478 p. Accessible sur : www.anses.fr
- [3] DELABRE L. ET AL. – L'exposition professionnelle à la silice cristalline en France en 2017 : une question toujours d'actualité. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 2023, 1, pp. 16-24. Accessible sur : http://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2023/1/2023_1_2.html
- [4] INRS – Cabines ventilées pour le travail de la pierre. 2005. Coll. Aide-mémoire technique, ED 947. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?ref=INRS=ED%20947>
- [5] LARROQUE D. ET AL. – Dossier : le captage des poussières. *Travail & sécurité*, 2019, 807, pp. 12-25. Accessible sur : www.travail-et-securite.fr
- [6] RÜHL R., WIRTH O. – Reducing respirable crystalline silica dust effectively on construction sites. CLR (European Institute for Construction Labour Research), 2011, 120 p. Accessible sur : <https://www.fiec.eu/our-projects/completed-projects/rcsd>
- [7] SONGMENE V., KOUAM J., BALHOUL A. – Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on fine and ultrafine particle emission and distribution during polishing of granite. *Measurement*, 2018, 114, pp. 398-408.
- [8] GAUDEL N., BÉMER D., GÉRARDIN F. – A parametric study of aerosol particle scavenging efficiency by spray droplets. *Journal of aerosol science*, 2022, 159, p. 105843.

ABATTAGE HUMIDE : DES GOUTTES POUR LA PRÉVENTION DE L'EXPOSITION AUX POUSSIÈRES

Des pulvérisations de gouttes d'eau judicieusement placées permettent de réduire à la source les émissions de poussières ou d'épurer un air pollué. Mais l'emploi de ce moyen de prévention ne s'improvise pas : il nécessite un dimensionnement pointu pour être réellement efficace et peut engendrer de nombreux risques secondaires qu'il ne faut pas négliger. Cet article fait le point sur les connaissances actuelles concernant l'abattage humide des poussières, et propose quelques règles simples pour améliorer son efficacité.

EMMANUEL
BELUT,
DENIS
BÉMER,
FABIEN
GÉRARDIN
INRS,
département
Ingénierie des
procédés

NAÏMA
GAUDEL
INRS,
département
Métrologie
des polluants

L'un des points clés de la prévention du risque d'exposition des salariés à une atmosphère chargée en poussières est de réduire à la source les émissions. Parmi les solutions qui permettent une atténuation de ces émissions, l'abattage humide paraît être un procédé plutôt avantageux, notamment en situation extérieure. Rappelons que la technique de l'abattage humide consiste à pulvériser des gouttes de liquide (généralement de l'eau) pour capturer les particules de poussières dispersées dans l'air des lieux de travail (Cf. pp. 47-51). Les éléments polluants, capturés à la surface des gouttes ou entraînés dans leur sillage, sont ensuite rabattus vers le sol, ou éliminés par un autre dispositif de protection collective tel que la ventilation. Cette technique peut être utilisée aussi bien comme technique de réduction à la source que comme dispositif de protection collective à plus grande échelle. L'abattage humide peut également être utilisé comme dispositif d'épuration en ligne après captage des polluants par aspiration; on parle alors de « laveur humide ». Les secteurs d'activité potentiellement concernés par l'application de cette technique sont préférentiellement des activités fortement émissives de poussières : BTP, industries extractives (mines et carrières), désamiantage, compostage, ateliers de travail de la pierre, déconstruction de bâtiments, etc. Si l'abattage humide a fait l'objet d'investigations scientifiques relativement conséquentes pour le traitement des polluants gazeux, les mécanismes de capture des particules contenues dans l'air par les gouttes demeurent mal connus.

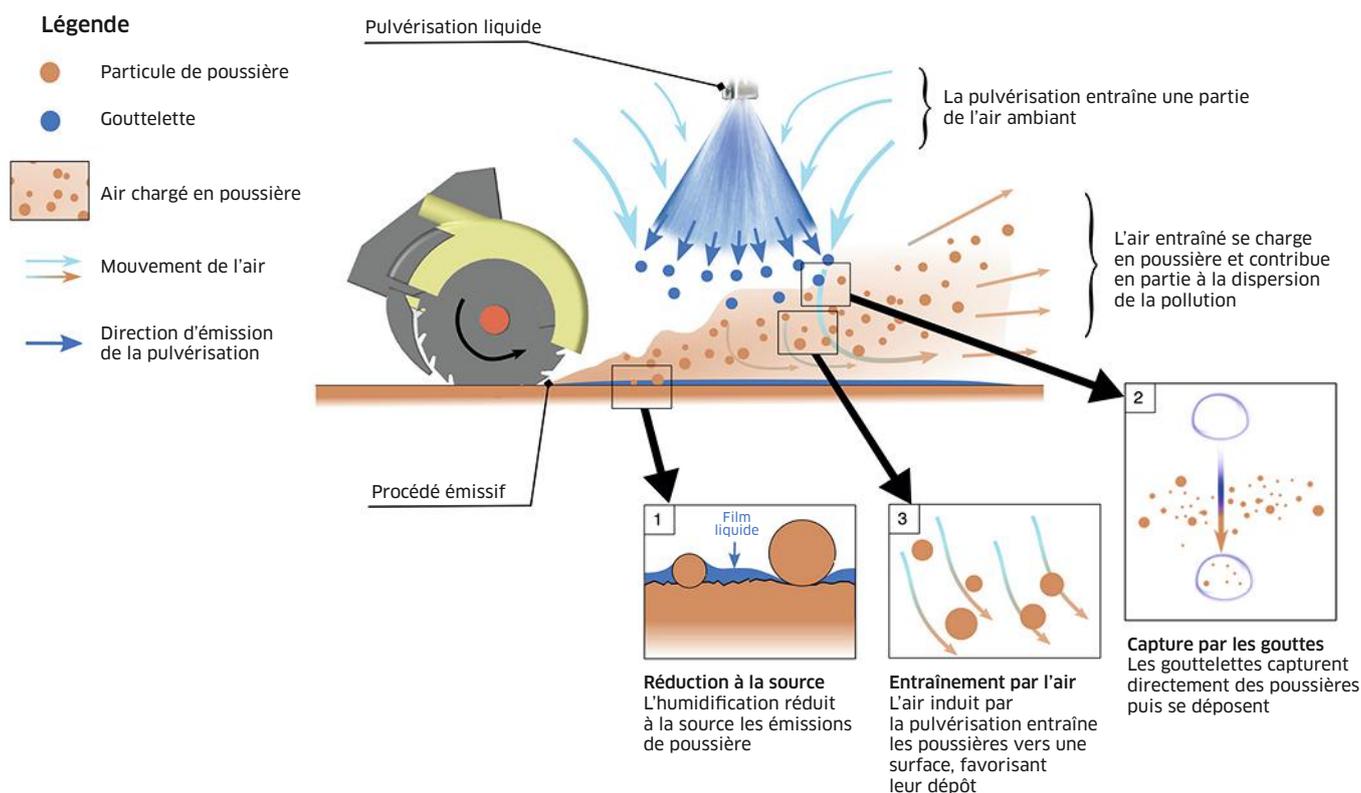
Des travaux récents ont été menés à l'INRS afin de faire avancer la connaissance des processus qui interviennent dans l'abattage humide, de manière à présenter aux préventeurs les intérêts et les limites de cette technique. Un modèle prédictif de l'efficacité de collecte des aérosols polluants par abattage humide adapté aux situations de travail a été développé. Des avancées significatives dans le domaine de la science des aérosols ont également été faites grâce aux recherches réalisées sur la microphysique de capture. Les travaux conduits dans cette étude permettent d'envisager l'utilisation de la simulation numérique, mais également de modèles simplifiés pour évaluer *a priori* l'efficacité de l'abattage humide comme technique d'assainissement appliquée à diverses situations d'hygiène industrielle.

L'objectif de cet article est, sur la base de connaissances récemment développées, de proposer des recommandations simples pour améliorer l'efficacité de collecte des poussières, aussi bien pour une mise en œuvre en condition extérieure que pour des dispositifs d'épuration destinés au lavage d'effluents, et également, d'en présenter les risques et limites.

Phénoménologie de l'abattage humide des poussières

L'abattage humide agit *via* trois modes d'action :

- la réduction à la source des émissions de poussière ;
- la capture directe des poussières aéroportées par les gouttes pulvérisées ;



• l'entraînement des poussières par les mouvements d'air induits par la pulvérisation de liquide. Ces trois modes d'action sont illustrés sur la Figure 1, qui schématise une situation typique d'abattage humide.

La réduction des émissions à la source

L'humidification des produits à l'origine des émissions de poussières (matériaux découpés ou usinés, matériaux pulvérulents manipulés, surfaces poussiéreuses, etc.) diminue drastiquement la propension des particules à être mises en suspension. Cela est dû aux forces de tension superficielle du liquide pulvérisé, qui accroissent considérablement les forces de cohésion entre les poussières susceptibles d'être mises en suspension, *via* la formation de films liquides entre particules ou entre particules et surfaces. Pour mettre en suspension les poussières, un surcroît d'énergie est nécessaire pour rompre les films liquides, par rapport à une situation sans humidification. Automatiquement, les quantités de poussières dispersées sont réduites et les particules ou agglomérats mis en suspension présentent des diamètres aérodynamiques¹ plus grands et sont moins susceptibles d'être inhalables.

L'efficacité de ce mode de réduction des émissions à la source est cependant limitée par la capacité des sprays utilisés à mouiller en profondeur les matériaux travaillés et à former un film liquide

permanent sur les surfaces travaillées, avant que le processus à l'origine de la mise en suspension des poussières n'intervienne. La nature des matériaux (e.g. hygroscopie, hydrophilie, porosité) joue un rôle central dans l'efficacité du mouillage comme moyen de réduction à la source des émissions.

À noter que pour ce premier mode d'action, on parle davantage de « travail à l'humide » (Cf. article précédent pp. 47-51) que d'abattage humide. Cela ne sera pas davantage développé dans cet article.

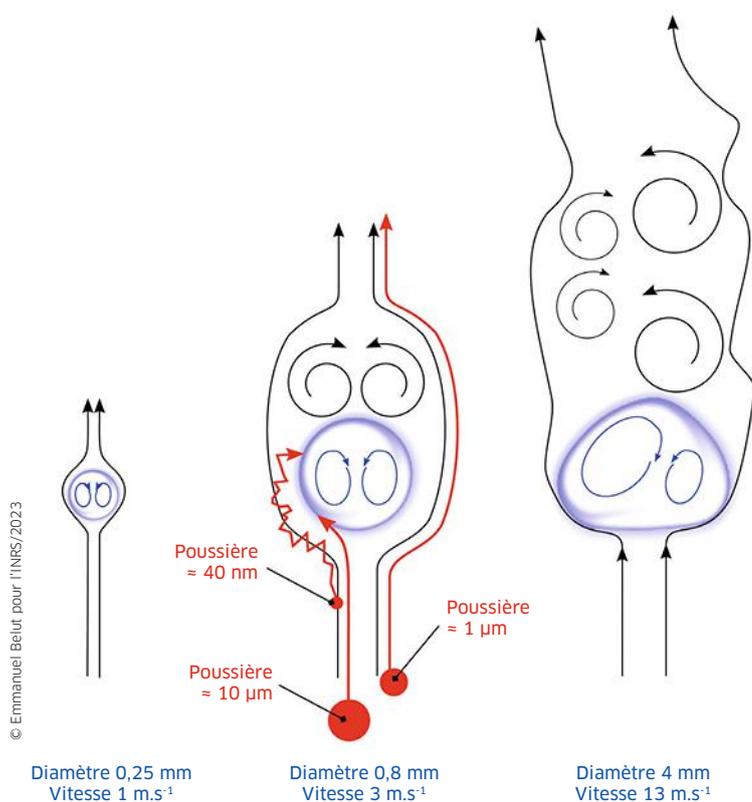
La capture des poussières par les gouttes

Lorsqu'un air chargé en poussières est traversé par une pulvérisation de gouttes, celles-ci peuvent capturer une partie des poussières qu'elles rencontrent *via* cinq principaux mécanismes de collecte : par interception-impaction, par diffusion brownienne, par diffusiophorèse, par thermophorèse ou par attraction électrostatique [1]. Ces poussières sont ensuite rabattues sur les surfaces (généralement le sol) avec les gouttes qui les transportent, ce qui permet de réduire leur concentration dans l'atmosphère de travail.

Avant d'évoquer ces mécanismes de collecte, il faut tout d'abord décrire l'état d'une goutte de liquide pulvérisée dans l'air et son environnement immédiat. Les gouttes pulvérisées, dont le diamètre est typiquement compris entre 40 µm et 4 mm, sont émises à une vitesse significativement différente de celle de l'air ambiant (typiquement,

↑ FIGURE 1
Les trois modes d'action de l'abattage humide.





↑ FIGURE 2
Écoulements
typiques de l'air
(en noir), du
liquide (en bleu)
et des poussières
(en rouge) autour
d'une goutte en
chute libre vers le
bas de la figure,
pour plusieurs
diamètres de
gouttes utilisées
en abattage
humide.

entre 1 et quelques dizaines de m.s^{-1}) et cette vitesse évolue vers leur vitesse de sédimentation, ou vitesse terminale de chute (typiquement, entre 5 cm.s^{-1} et 10 m.s^{-1} pour les tailles évoquées). Par conséquent, il existe toujours un mouvement relatif entre les gouttes et l'air chargé en poussières qui les environne.

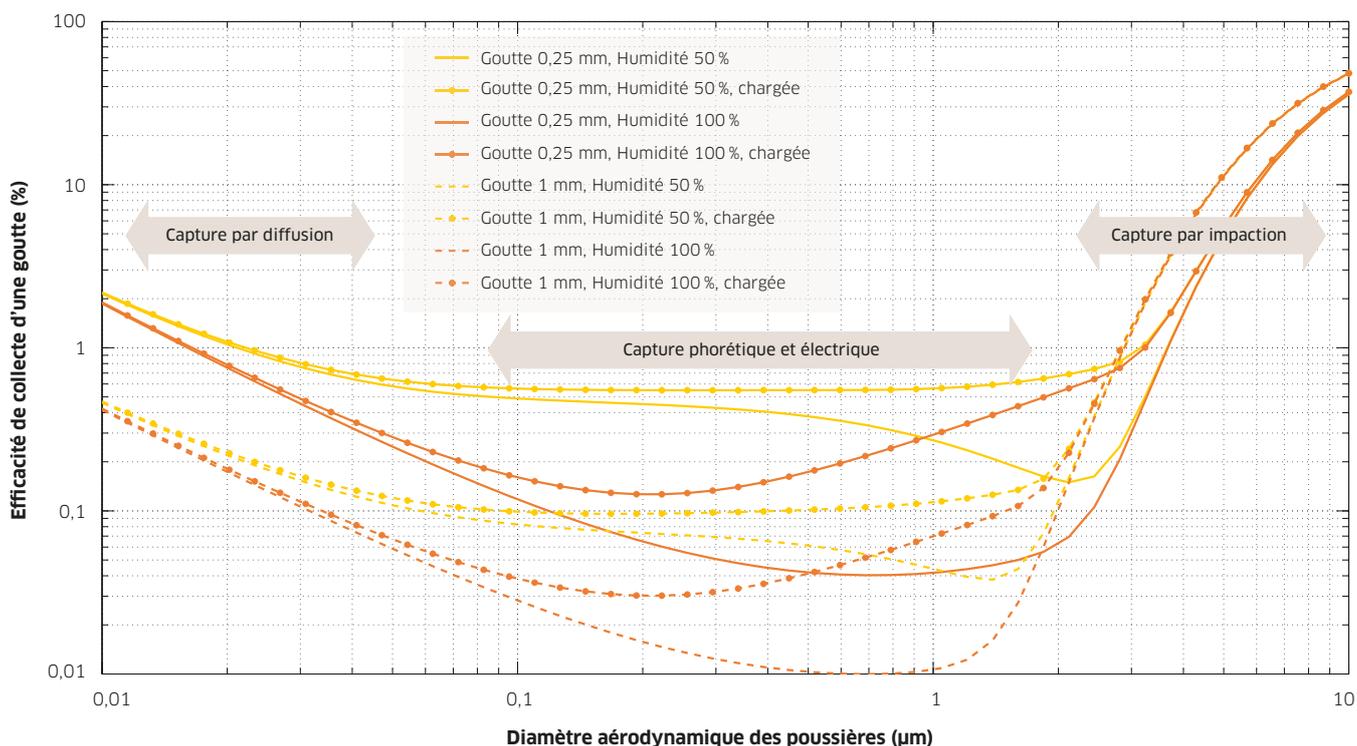
La surface des gouttes est imperméable à l'air : l'air est donc contraint de les contourner. En ce qui concerne leur forme, la tension superficielle du liquide tend à les maintenir sous la forme la plus sphérique possible. Néanmoins, les gouttes peuvent se déformer, et le liquide à l'intérieur se mettre en mouvement, en fonction des forces aérodynamiques exercées par le mouvement de l'air autour d'elles. Plus une goutte est petite et plus sa vitesse relative par rapport à l'air ambiant est faible, plus elle sera sphérique. En revanche, plus une goutte est grande et plus sa vitesse relative est élevée, plus elle va avoir tendance à s'aplatir face à l'air incident [2] (Cf. Figure 2). La goutte peut même être amenée à se fragmenter spontanément [2] au-delà de certaines dimensions ou vitesses relatives (au-delà de 4 mm de diamètre environ pour des gouttes d'eau).

La Figure 2 résume cette description de l'environnement immédiat d'une goutte d'abattage humide, les trajectoires de l'air autour de la goutte et du liquide dans la goutte étant matérialisées par des

flèches. Les gouttes de plus grandes dimensions présentent un sillage turbulent et une forme qui varie de manière pulsatile au cours de leur déplacement. Bien entendu, cela affecte de manière déterminante la collecte des poussières par les gouttes.

Les poussières inhalables en suspension dans l'air autour des gouttes, qui présentent un diamètre aérodynamique inférieur à $100 \mu\text{m}$, sont entraînées par les écoulements d'air matérialisés sur la Figure 2, mais suivent plus ou moins parfaitement ces écoulements en fonction de leurs dimensions (trajectoire typique des poussières en rouge). Les poussières de plus de quelques microns réagissent avec trop de retard aux changements de direction de l'air pour éviter la goutte et sont alors collectées par impaction inertielle. Les poussières dont le diamètre aérodynamique est voisin du micromètre suivent parfaitement les écoulements d'air et évitent la goutte, et sont donc très difficilement capturées. Enfin, les poussières de dimensions nanométriques diffusent sous l'effet du mouvement brownien des molécules d'air qui les entourent, ce qui peut conduire à leur capture par la goutte. Ainsi, en fonction de la taille caractéristique des poussières, on identifie immédiatement une efficacité de collecte par les gouttes qui est minimale pour des diamètres autour de $1 \mu\text{m}$, alors que des poussières plus petites ou plus grandes sont plus efficacement collectées. Cette situation est classique des mécanismes de filtration ou de dépôt des poussières sur les parois. Dans le cas des gouttes, le minimum d'efficacité de collecte pour les poussières voisines de $1 \mu\text{m}$ est connu sous le nom de « *minimum de Greenfield* » [3], qui est à rapprocher de la notion de MPPS (i.e. dimension des particules les plus pénétrantes) en filtration.

En plus de la capture par impaction inertielle et par diffusion brownienne, les poussières peuvent être amenées à impacter la goutte sous l'effet de la diffusiophorèse et de la thermophorèse. En effet, le liquide pulvérisé n'est généralement pas à la même température que l'air ambiant et cet air est plus ou moins saturé par les vapeurs du liquide. Il en résulte une évaporation ou une condensation des gouttes, qui accentue l'écart de température entre air et gouttes (l'écart atteint facilement une dizaine de degrés) et les variations de concentration en vapeur de l'air (humidité relative dans le cas de gouttes d'eau). Les variations de température et de concentration en vapeur autour des gouttes engendrent une migration par diffusion des molécules dans l'air, des zones les plus chaudes vers les zones les plus froides (thermophorèse) et des zones les plus concentrées en vapeur vers les zones les moins concentrées (diffusiophorèse). Ces mouvements de diffusion



poussent avec eux les poussières, ce qui, suivant le sens du mouvement (vers les gouttes ou à l'opposé), augmente ou réduit l'efficacité de collecte des gouttes. On parle d'effet phorétique.

Enfin, les phénomènes électrostatiques modulent également la capture des poussières par les gouttes : les gouttes présentent une distribution de charges électriques à leur surface, et les poussières sont également souvent chargées, même si la charge électrique globale du nuage de poussière est généralement neutre. Ces charges électriques induisent des forces électrostatiques entre les poussières et les gouttes, qui accroissent presque toujours l'efficacité de collecte.

Pour résumer de manière quantitative l'effet de ces mécanismes de collecte, la Figure 3 représente l'évolution de l'efficacité de collecte d'une goutte d'eau en fonction du diamètre aérodynamique des poussières à rabattre, d'après [4]. Cette efficacité est définie comme le rapport entre le débit de poussière capturé par la goutte (nombre par seconde) et le débit de poussière balayé par la goutte. Plusieurs tailles de gouttes, plusieurs humidités relatives et plusieurs niveaux de charge électrique sont représentés. Comme évoqué précédemment, on peut constater que, si l'efficacité de rabatement d'une seule goutte est notable, quoique faible (> 1%), pour les poussières de moins de 20 nm et de plus de 3 µm, elle devient inférieure à 0,1% dans la zone du minimum de Greenfield entre 100 nm et 1 µm. Dans cette zone, seuls les effets phorétiques (si l'humidité relative

est faible) ou les charges électriques (si les poussières et les gouttes sont chargées) parviennent à limiter la diminution drastique de l'efficacité de collecte. Par ailleurs, on peut constater que le diamètre de la goutte considéré est déterminant (on peut gagner un facteur 100 sur l'efficacité en multipliant ou divisant par 4 le diamètre des gouttes). Ainsi, les poussières en suspension sont collectées par une goutte isolée avec une efficacité relativement faible, voire infinitésimale pour les poussières entre 100 nm et 1 µm, en l'absence de charge électrique et dans un air humide. Néanmoins, tout comme l'efficacité d'une fibre de filtre ne présage pas de l'efficacité d'un filtre complet, l'efficacité de rabatement d'une goutte ne suffit pas à déterminer l'efficacité d'une pulvérisation complète : il faut intégrer en plus la concentration en nombre de gouttes dans le volume de travail, qui dépend du nombre de gouttes pulvérisées et de leur temps de résidence dans l'air, qui est relié à leur diamètre.

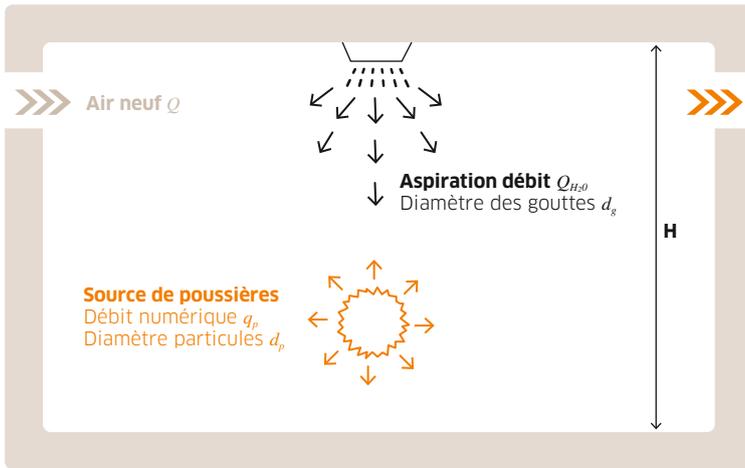
L'entraînement des poussières par l'air induit

Le troisième mode d'action par lequel l'abattage humide agit sur la concentration atmosphérique en poussière est l'induction d'air. La pulvérisation d'eau entraîne en effet l'air ambiant, en raison du volume d'eau déplacé, mais surtout à cause de l'entraînement de l'air par frottement sur les gouttes (traînée des gouttes). Les effets de cet entraînement d'air sont les suivants :

- un entraînement direct de l'air chargé en poussières dans la direction du spray, ce qui peut

FIGURE 3 ↑ Efficacités de collecte des poussières par les gouttes, pour plusieurs humidités relatives et avec ou sans charges électriques (gouttes de 0,25 mm et 1 mm).





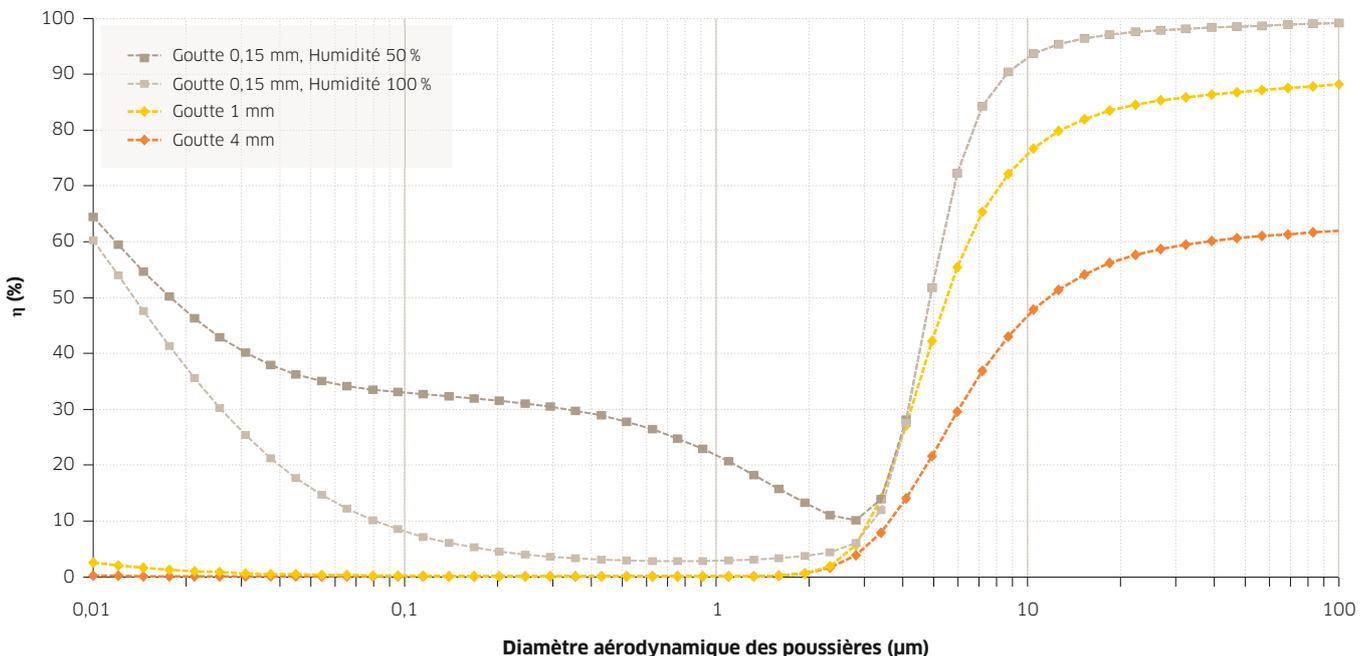
↑ FIGURE 4
Situation simplifiée d'abattage humide.

favoriser un dépôt des poussières sur les surfaces et donc une diminution de la concentration dans l'air ;

- une dilution de la concentration en poussières et en gouttes dans le volume de travail à cause de l'apport d'air entraîné. Cette dilution n'est pas souhaitée, car elle réduit l'efficacité de capture des poussières par les gouttes ;
- une dispersion d'air pollué à plus grande distance du procédé émissif qu'en l'absence de pulvérisation.

Phénoménologiquement, il est reconnu que plus les angles de pulvérisation² sont grands, plus les gouttes sont petites, plus le débit d'air induit est élevé. Pour améliorer l'efficacité globale de rabattement, il est recommandé de confiner à l'aide de parois les zones où a lieu la pulvérisation pour limiter l'induction d'air.

↓ FIGURE 5
Impact de la taille des gouttes pulvérisées et de l'humidité relative sur la réduction de l'empoussièrément, pour un débit d'eau fixé.



Applications et efficacité de l'abattage humide Efficacité sur une situation typique

L'efficacité avec laquelle l'abattage humide peut réduire les concentrations en poussières peut être illustrée en considérant une application simple, qui permet de dégager quelques paramètres de fonctionnement optimaux. La situation de travail considérée est schématisée sur la Figure 4. Dans cette situation, un procédé polluant émet des poussières de diamètre aérodynamique d_p à un débit numérique q_p , dans un local de volume V et de hauteur H . L'air du local est renouvelé à l'aide d'un débit d'air neuf Q , en ne considérant que le mode de rabattement par capture des poussières par les gouttes.

En première approximation, en l'absence de pulvérisation d'eau, la concentration moyenne en poussières dans le local tend vers la valeur : $C_{base} = q_p / Q$ (en particules.m⁻³).

Si le dispositif d'aspersion est placé au plafond de la pièce, comme schématisé sur la Figure 4, la concentration devient C . Il est alors possible d'estimer le taux de réduction de l'empoussièrément η dû à l'abattage humide par rapport au niveau de base C_{base} , à l'aide de la relation [5] :

$$\eta = \frac{C_{base} - C}{C_{base}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\pi \dot{n}_g H}{4Q} d_g^2 E}$$

E étant l'efficacité de collecte d'une seule goutte présentée sur la Figure 3, calculée en admettant que les gouttes d'eau sont à leur vitesse terminale de chute sur l'essentiel de la hauteur, \dot{n}_g étant le débit numérique de gouttes pulvérisées de diamètre d_g . Il est ainsi possible d'obtenir les taux

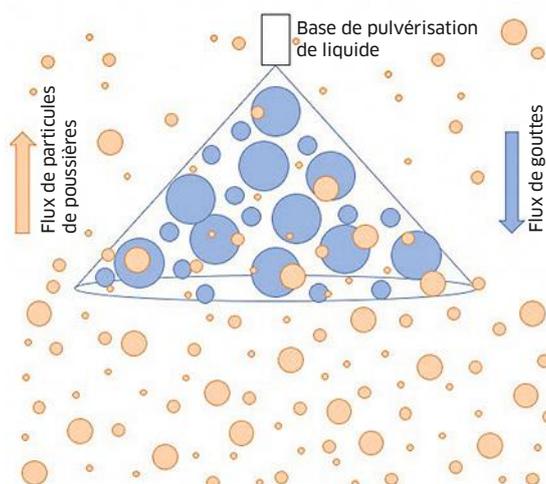
de réduction de la pollution dus à l'abattage pour différentes conditions opératoires : débit d'eau, taille des gouttes et humidité relative notamment. À titre d'exemple, dans le cas d'un local de 90 m³ faiblement ventilé (taux de renouvellement de 1 h⁻¹) avec une pulvérisation depuis une hauteur de 3 m, la Figure 5 illustre l'impact de la taille des gouttes pulvérisées et de l'humidité relative sur la réduction de l'empoussièremment, pour un débit d'eau fixé à 2 L.min⁻¹.

La Figure 5 indique que pour un même débit d'eau pulvérisé, il est déterminant de choisir les gouttes les plus fines possible pour optimiser le rabattement, quelle que soit la taille des poussières à rabattre. Pour ces tailles de gouttes, on peut également constater l'effet positif d'une hygrométrie basse sur le taux de rabattement en raison de l'augmentation de l'efficacité de collecte des gouttes due aux forces phorétiques qui apparaissent lorsque les gouttes s'évaporent. Néanmoins, il existe toujours un minimum d'efficacité du processus d'abattage autour de 1 µm que seule l'augmentation du débit de liquide permettrait de surmonter.

Illustration sur des travaux expérimentaux menés par l'INRS

Une approche expérimentale complémentaire a été mise en œuvre, afin de mettre en évidence l'effet d'un certain nombre de paramètres du procédé d'abattage humide, sur son efficacité dans une configuration donnée [5]. Cette approche de laboratoire consiste en une colonne parallélépipédique de section 0,12 m² et de hauteur 1,80 m dans laquelle l'abattage humide est réalisé. Des poussières de laboratoire de type aluminés sont utilisées pour générer un aérosol de particules de diamètres compris entre 0,6 µm et 10 µm, en concentration connue. Les particules de poussière sont transportées dans un flux d'air ascendant, tandis que des buses de pulvérisation d'eau sont utilisées pour les abattre à contre-courant de ce flux de poussières. Ces buses de pulvérisation, placées à différentes hauteurs dans la colonne d'abattage, ont été caractérisées en termes de débit liquide, de diamètre et de vitesse de gouttes, ainsi que de section de pulvérisation couverte par ces buses. Pour exemple, les diamètres de gouttes étudiés sont compris entre 150 µm et 600 µm. Un schéma illustrant ce contacteur poussières/liquide à contre-courant est présenté sur la Figure 6.

La mesure de la concentration en poussières a été réalisée à l'aide d'un compteur de particules, d'un impacteur et par prélèvement sur filtre (gravimétrie). Ces mesures de concentration, avec et sans procédé d'abattage humide, ont permis de calculer l'efficacité de collecte totale (indifféremment de la



← FIGURE 6 Schéma de principe illustrant le contacteur poussières/liquide à contre-courant utilisé pour l'approche expérimentale des travaux menés à l'INRS.

DÉBIT LIQUIDE / EFFICACITÉ DE COLLECTE TOTALE	DIAMÈTRE DES GOUTTES / EFFICACITÉ DE COLLECTE TOTALE
1,35 L.min ⁻¹ / 19 %	244 µm / 13 %
2,09 L.min ⁻¹ / 39 %	153 µm / 21 %

taille des particules) et spectrale (i.e. par classe de taille de particule). L'influence sur l'efficacité de l'abattage humide de différents paramètres, tels que le diamètre des particules et des gouttes, le débit d'air et le débit d'eau ou encore la hauteur de positionnement de la buse de pulvérisation, a été étudiée expérimentalement.

Ces travaux expérimentaux ont permis de confirmer les préconisations générales données précédemment. Deux exemples d'efficacité de collecte totales et spectrales sont donnés dans le Tableau 1 et sur la Figure 7. Ces résultats montrent qu'augmenter le débit liquide d'un spray de pulvérisation, ou encore diminuer le diamètre des gouttes, entraînent une augmentation de l'efficacité de collecte des poussières. À noter que l'efficacité de collecte des particules submicroniques est toujours très faible, quels que soient les paramètres de fonctionnement.

↑ TABLEAU 1 Exemples de l'influence du débit liquide et du diamètre des gouttes de la buse de pulvérisation sur l'efficacité de collecte totale d'un aérosol polydispersé de diamètre aérodynamique médian (en masse) de 1,45 µm (les autres paramètres étant identiques).

Résumé sur les paramètres de fonctionnement optimaux de l'abattage humide

Les études menées par l'INRS permettent de formuler quelques règles simples pour optimiser l'efficacité de l'abattage humide des poussières :

- pulvériser au plus près de l'émission et couvrir toute la zone ;
- utiliser des gouttes d'une taille voisine de 150-200 µm ;



- prévenir l'induction d'air neuf dans le spray en confinant la zone d'émission et d'abattage ;
- réserver l'usage de l'abattage humide aux poussières de plus de quelques microns ;
- anticiper une faible efficacité d'épuration pour les poussières plus fines.

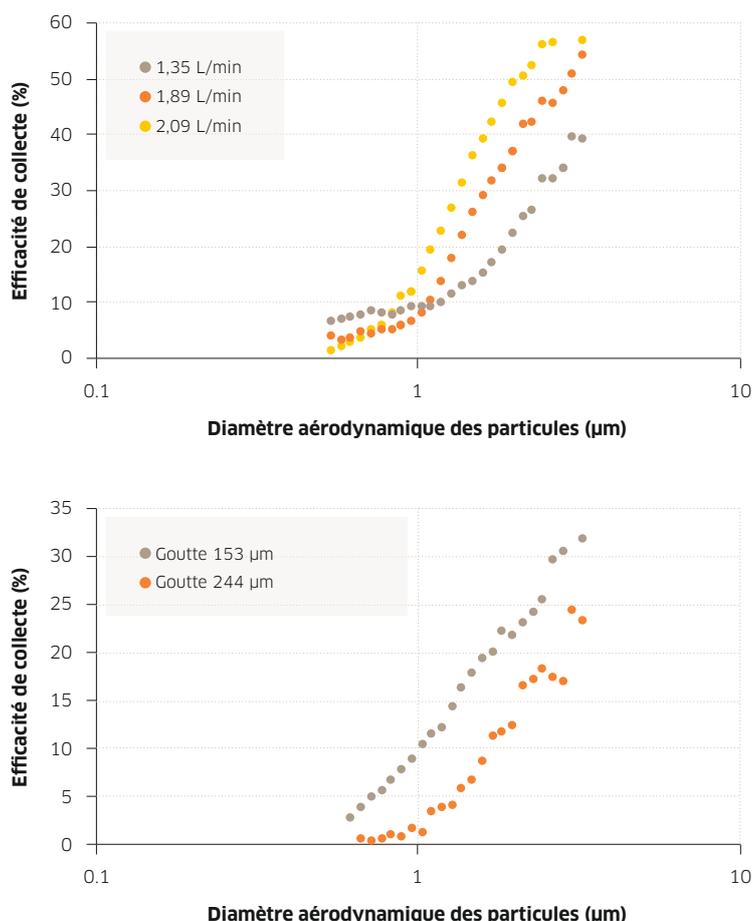
Risques possiblement induits par l'abattage humide et contraintes d'usage

On attend en premier lieu d'un moyen de prévention de ne pas induire davantage de risques qu'il n'en réduit. À ce titre, mettre en œuvre l'abattage humide nécessite de prendre en compte de nombreux points de vigilance qu'il convient de considérer avant d'y avoir recours. Parmi lesquels :

- risque de relargage : risque d'inhalation de gouttes chargées en polluant, risque de remise en suspension ou de relargage après évaporation, etc. ;
- risques physiques : glissance des sols, risque électrique, etc. ;
- risques biologiques : qualité de l'eau de pulvérisation avec développement de micro-organismes susceptibles d'être pathogènes (légionelles par exemple) ; développement de moisissures dans les locaux humides ;
- augmentation de la dispersion : air induit potentiellement à capter ;
- traitement des effluents ;
- consommation en eau et en énergie : restrictions possibles de l'accès à l'eau et coût énergétique lié à la mise en pression des buses ;
- détériorations diverses, dommages aux ouvrages en général.

Conclusions et préconisations

Les travaux présentés dans cet article ont permis de faire avancer la connaissance sur la capacité de l'abattage humide à être déployé comme technique d'assainissement d'une atmosphère contenant des poussières. Son application pour la capture de particules de diamètre supérieur à quelques micromètres peut apporter une réponse intéressante en termes de prévention, à condition de respecter une mise en œuvre précise. L'adéquation entre tailles des poussières, diamètres des gouttes, débit d'eau et positionnement des buses est déterminante et requiert un dimensionnement au cas par cas. L'abattage humide se révèle globalement inefficace pour le piégeage des particules sub-microniques. Les travaux conduits dans cette étude permettent néanmoins d'envisager la simulation numérique et des modèles simplifiés pour évaluer *a priori* l'efficacité de l'abattage humide comme technique d'assainissement appliquée à diverses situations d'hygiène industrielle. Il convient de rappeler que le recours à cette technique comme moyen de protection collective peut



induire d'autres risques (physiques, biologiques, etc.) et peut être confronté à des contraintes environnementales potentiellement bloquantes. ●

1. Le diamètre aérodynamique est égal au diamètre d'une sphère de densité 1 ayant la même vitesse terminale de chute que la particule.
2. Angle au sommet du cône d'émission d'un spray de pulvérisation.

↑FIGURE 7 Exemples d'efficacité de collecte en fonction du diamètre aérodynamique des particules. En haut : influence du débit liquide de la buse de pulvérisation. En bas : influence de la taille des gouttes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PRUPPACHER H.R., KLETT J.D. – *Microphysics of clouds and precipitation* (2nd ed.). Atmospheric and oceanographic sciences library, 2010.
- [2] OESTERLÉ B. – *Écoulements multiphasiques*. Hermès, 2006.
- [3] GREENFIELD S.M. – Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere. *J. Meteorol.*, 1957, 14, p. 115.
- [4] CHERRIER G., BELUT E., GÉRARDIN F. ET AL. – Aerosol particles scavenging by a droplet: microphysical modeling in the Greenfield gap. *Atmos. Environ.*, 2017, 166, pp. 519-530.
- [5] GAUDEL N., BÉMER D., GÉRARDIN F. – A parametric study of aerosol particle scavenging efficiency by spray droplet. *Journal of aerosol science*, 2022, 159, p. 105843.