SÉBASTIEN BAU, LISE ALONSO, NAÏMA GAUDEL, AUDREY HUMBERT, VIRGINIE MATERA, BARBARA SAVARY, XAVIER SIMON, SOPHIE TOMAZ
INRS, département Métrologie des polluants

EMMANUEL BELUT, DENIS BÉMER, SANDRINE CHAZELET
INRS, département Ingénierie des procédés

LAURELINE COATES, STÉPHANE MALARD
INRS, département Études et assistance médicales

BRUNO COURTOIS
INRS, département Expertise et conseil technique

FRÉDÉRIC COSNIER, LAURENT GATÉ
INRS, département Toxicologie et biométrologie

Décryptage

LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES AÉROSOLS AU POSTE DE TRAVAIL

Quels apports pour la santé et la sécurité au travail ?

La connaissance de la distribution granulométrique des aérosols apporte des éléments complémentaires à l'approche conventionnelle d'évaluation des risques liés aux agents chimiques et biologiques. Dans le but de promouvoir la capitalisation de telles données, cet article fait le point sur ce que représente la distribution granulométrique d'un aérosol, et les apports potentiels de son utilisation à différentes fins en lien avec la santé et la sécurité au travail.

SIZE DISTRIBUTION OF AEROSOLS AT THE WORKSTATION: VALUABLE KNOWLEDGE FOR OSH? ***Knowledge about aerosol size distribution provides additional information to the conventional risk assessment of chemical and biological agents. With a view to promoting the capitalisation of such data, this article explains the significance of aerosol size distribution and different ways in which it could be useful for occupational safety and health.***

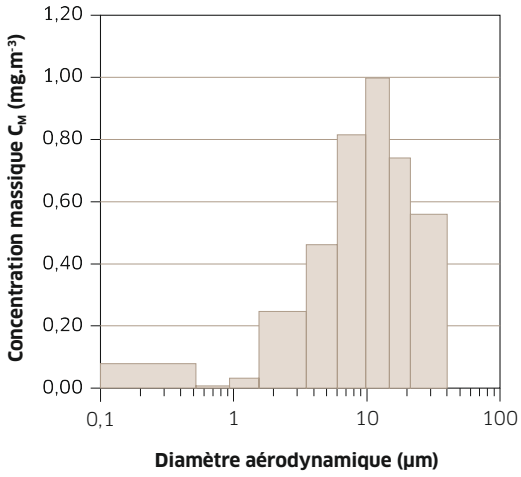
Les particules présentes dans l'air des lieux de travail peuvent être d'origine naturelle, incidentelle, liées à la production ou à l'utilisation de matériaux, ou émises par l'emploi d'outils, de machines, de procédés, etc. Elles présentent de grandes diversités de composition, concentration et taille. La gamme de tailles à considérer pour les aérosols s'étend sur plusieurs décades, de quelques nanomètres à une centaine de micromètres. Parmi les paramètres impliqués dans l'évaluation des risques liés aux agents chimiques et biologiques, la distribution granulométrique des aérosols constitue une donnée d'intérêt. Complémentaire à l'approche conventionnelle qui repose principalement sur la détermination de leur concentration en masse ou en nombre, elle permet de mieux comprendre l'émission, le transport ainsi que les effets sanitaires des particules. La distribution granulométrique intervient également dans le choix des dispositifs de prélèvement ou le dimensionnement des moyens de protection à mettre en œuvre.

La granulométrie des aérosols, de quoi s'agit-il ?

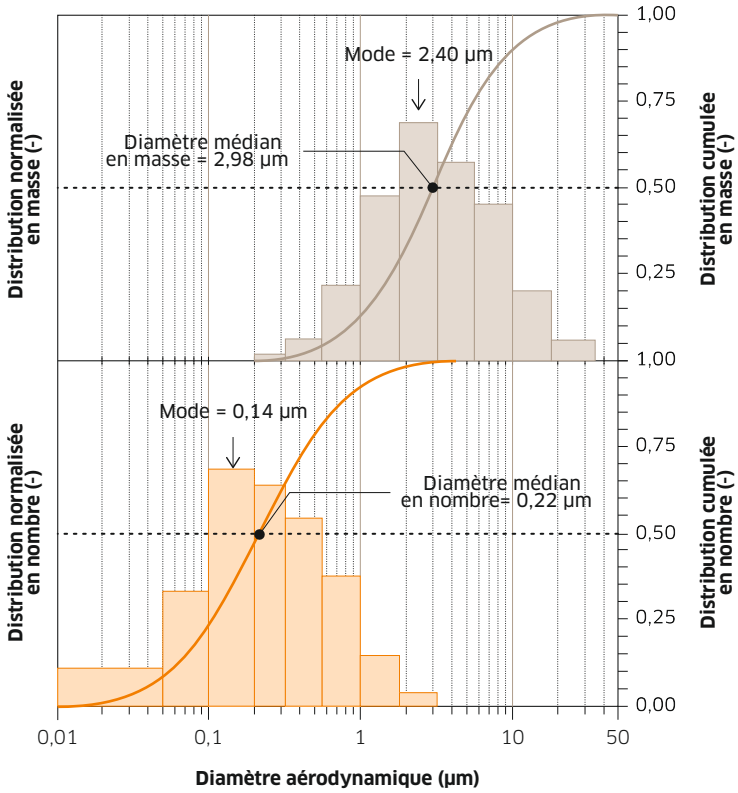
En général, les particules sont polydispersées, c'est-à-dire qu'elles couvrent une large gamme de tailles, souvent sur plusieurs ordres de grandeur. La distribution granulométrique d'un aérosol désigne la répartition de la quantité de particules dans différentes classes granulométriques *(Cf. Figure 1, page suivante)*. Cette répartition est couramment décrite sur une échelle logarithmique pour tenir compte de cette large étendue.

→

La quantité de particules peut s'exprimer en termes de nombre de particules, masse, ou toute autre grandeur quantifiable (volume, surface, etc.). Le même aérosol peut présenter des distributions granulométriques différentes selon la métrique utilisée. En effet, le nombre fait référence au décompte des particules dans chaque classe granulométrique ; il peut être converti en masse en prenant en compte leur forme (sphères, fibres cylindriques, feuillets, etc.) et leur masse volumique. Par exemple, la masse d'une particule sphérique de 10 µm est la même que celle d'un milliard de particules sphériques de 10 nm. Pour s'affranchir de la morphologie variable des particules, la taille est ramenée à un diamètre équivalent. Dans ce qui suit, seul le diamètre équivalent aérodynamique[1] est mentionné : il permet de décrire le comportement des particules dans l'air et leur pénétration dans les voies respiratoires. Le diamètre aérodynamique des particules est utilisé pour définir les fractions conventionnelles (inhalable, thoracique et alvéolaire) liées à la santé.



↑ **FIGURE 1** Exemple de la distribution granulométrique en masse d'un aérosol à proximité immédiate d'une opération de broyage mécanique de déchets tertiaires dans un centre de valorisation des déchets recyclables.



↑ **FIGURE 2** Exemples de distributions granulométriques (histogrammes, échelle de gauche) du même aérosol en masse (partie supérieure) et en nombre (partie inférieure), leurs distributions cumulées croissantes respectives (courbes continues, échelle de droite) et les diamètres modaux et médians associés.

De nombreux descripteurs peuvent être utilisés pour caractériser la distribution granulométrique d'un aérosol. Les plus utilisés sont le diamètre modal (ou mode), faisant référence à la classe de taille la plus représentée, et le diamètre aérodynamique médian en masse (MMAD, pour *mass median aerodynamic diameter)*. Le MMAD correspond au diamètre pour lequel la distribution cumulée croissante est égale à 50 %. Dans l'exemple de la *Figure 2,* le diamètre modal en masse est à 2,40 µm (partie supérieure) et celui en nombre à 0,14 µm (partie inférieure) ; le MMAD est quant à lui égal à 2,98 µm (partie supérieure). L'un ou l'autre de ces descripteurs pourra être choisi en fonction de l'objectif de mesure fixé au préalable[2].

Afin de compléter la description de la distribution granulométrique d'un aérosol, l'écart-type géométrique (ETG) est couramment utilisé pour décrire la dispersion des tailles de particules autour du MMAD ou du diamètre modal. Plus l'ETG est élevé, plus l'étendue de taille des particules autour de ces valeurs est importante. Une distribution strictement monodispersée a un ETG égal à 1, signifiant que toutes les particules ont la même taille. Par exemple, si la distribution granulométrique s'étend sur deux ordres de grandeur (entre 0,25 et 25 µm sur l'exemple de distribution en masse sur la *Figure 2*, partie supérieure), soit un rapport de 100 entre le diamètre maximum et le diamètre minimum, alors l'ETG est d'environ 2,15. Dans les environnements professionnels, les aérosols sont généralement polydispersés et suivent une loi dite log-normale, avec un ETG typique autour de 2,5, indiquant que les diamètres couvrent près de trois ordres de grandeur.

La granulométrie des aérosols, une composante-clé

La distribution granulométrique intervient dans un certain nombre d'étapes-clés sur l'ensemble du cycle de vie d'un aérosol dans un environnement professionnel, comme le montre la *Figure 3*.

De la source aux situations d'exposition

L'exposition à un aérosol résulte d'un processus complexe de la source d'émission jusqu'à la zone

respiratoire d'un travailleur. Pour tout ce cycle de vie, la distribution granulométrique des particules joue un rôle fondamental.

La source désigne le processus à l'origine de l'émission d'aérosol. Il peut s'agir de la (re)mise en suspension de poussières ou de poudres, de particules engendrées par abrasion, de pulvérisation de gouttelettes, de condensation de vapeurs, de réactions chimiques en phase gazeuse, etc.

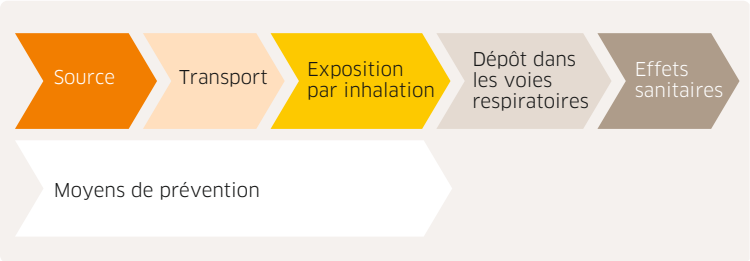
Après son émission, le transport de l'aérosol est influencé par les mouvements de l'air ambiant. En fonction de leur distribution granulométrique, les particules suivent plus ou moins les écoulements d'air et peuvent être transportées plus ou moins loin de leur lieu d'émission. Les particules se déposent progressivement sur les surfaces en fonction de leur taille : par sédimentation pour les particules de plus de quelques micromètres et par diffusion pour les particules plus fines. Ces mécanismes contribuent à réduire leur concentration dans l'air.

Si la dilution est très rapide en extérieur, sous l'effet du vent notamment, elle est essentiellement fonction du taux de renouvellement de l'air dans les locaux intérieurs. De ce fait, les écoulements complexes et turbulents de l'air participent à la variabilité des expositions dans le temps et dans l'espace.

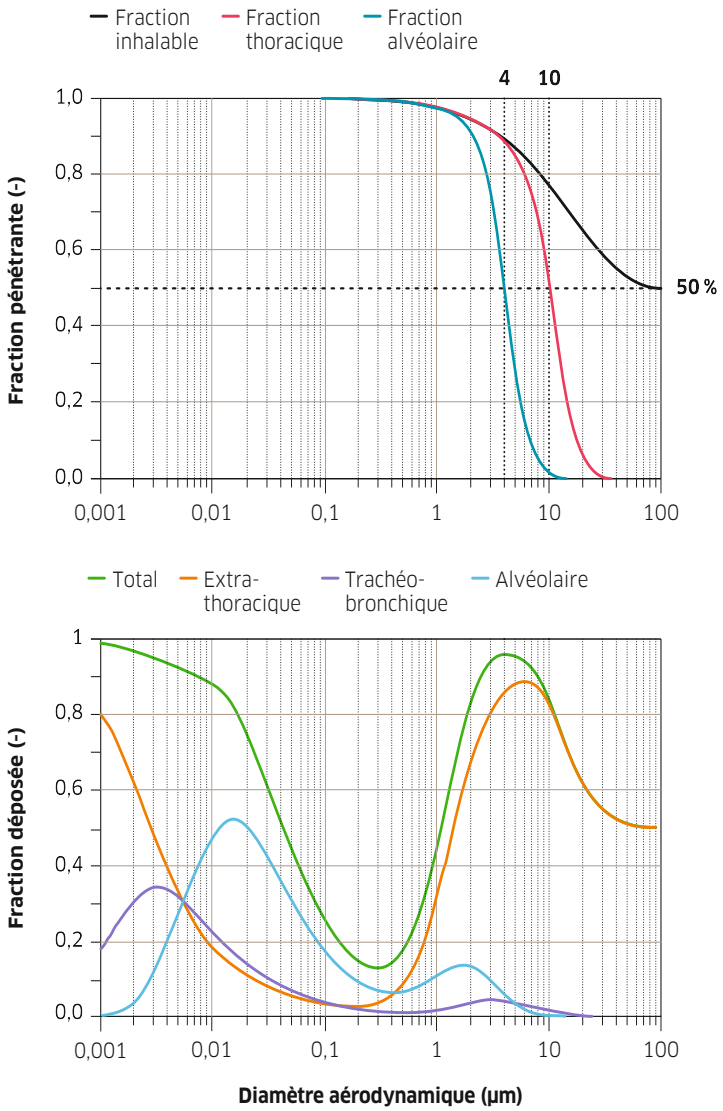
La variation de certaines propriétés d'un aérosol (morphologie, taille, composition chimique, etc.) au cours de son transport dans l'air est à l'origine de son vieillissement. Quelques exemples : les aérosols constitués de substances volatiles tendent à s'évaporer, conduisant à une diminution de la taille des particules qui les composent ; ceux composés de particules nanométriques en fortes concentrations sont sujets à agrégation, formant ainsi des particules de plus grandes dimensions ; les bioaérosols évoluent également en fonction des dommages que peuvent subir les particules biologiques au cours du temps (atteintes à l'intégrité des membranes ou au fonctionnement des cellules).

Enfin, la distribution granulométrique d'un aérosol influence la fraction de particules inhalées par un travailleur et donc, son exposition aux polluants particulaires. L'évaluation quantitative des expositions professionnelles repose sur l'utilisation de dispositifs de prélèvement individuel (cassette fermée, cyclone, etc.), positionnés dans la zone respiratoire du travailleur. L'objectif consiste à sélectionner et collecter, en fonction de leur taille, les particules afin de recueillir un échantillon représentatif d'une des trois fractions conventionnelles pertinentes dans le domaine de la santé au travail *(Cf. Figure 4, partie supérieure)* :

- fraction inhalable (particules inhalées par le nez et par la bouche dont la vitesse de sédimentation est inférieure à 25 cm/s. Il est communément admis que cela correspond à des particules de diamètre inférieur à 100 µm) ;
- fraction thoracique (particules inhalées pénétrant au-delà du larynx. Les particules d'un diamètre aérodynamique de 10 µm ont une probabilité de pénétration de 50 %) ;



↑ **FIGURE 3** Étapes-clés où la distribution granulométrique d'un aérosol peut être utile dans une démarche de prévention.



↑ **FIGURE 4** Fractions conventionnelles liées à la santé (partie supérieure), et fractions déposées dans les différents compartiments de l'appareil respiratoire humain (partie inférieure) – homme, respiration nasale uniquement, débit ventilatoire 1,3 m³/h, exercice léger, d'après le modèle de la CIPR *[source : CIPR/ICRP (Commission internationale de protection radiologique)* – Human respiratory tract model for radiological protection. *1994, publication n° 66. Ann. ICRP 24 ; 1-3].*

ENCADRÉ

« LES AÉROSOLS » : UNE THÉMATIQUE DE L'INRS EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ AU TRAVAIL À L'HORIZON 2028

Poussières, fumées, brouillards, particules fines… Autant de noms pour désigner des polluants présents dans l'air des lieux de travail et que l'on regroupe sous l'appellation d'« aérosols ».
Plus précisément, le terme « aérosol » désigne un ensemble de particules liquides ou solides en suspension dans l'air et en interaction avec ses différents constituants. Conventionnellement, on considère que seules les particules de moins de 100 µm de diamètre aérodynamique *(Cf. Note [1])* restent suffisamment longtemps en suspension pour former un aérosol.
Les aérosols sont à l'origine de nombreux risques professionnels : risque d'exposition chimique ou biologique (par inhalation, voie cutanée, ou ingestion), d'incendie ou d'explosion.
Cible historique de la prévention des risques professionnels, les aérosols ont été remis sur le devant de la scène lors de la pandémie de Covid-19, comme vecteurs potentiels de transmission. Cet épisode a révélé un besoin de connaissances complémentaires, notamment concernant la réduction à la source de leur production et les processus régissant leur transport en situation réelle. De plus, les diminutions de certaines valeurs limites d'exposition professionnelle vers des niveaux de plus en plus faibles, comme celles du manganèse, du cadmium, du nickel ou des poussières totales et alvéolaires, nécessitent un effort accru quant à la limitation de l'exposition des travailleurs aux aérosols.
Au regard de ces enjeux pour la santé et la sécurité au travail, l'INRS a souhaité mettre en place un ensemble d'actions coordonnées sur les aérosols dans son plan stratégique à l'horizon 2028.
Cette thématique propose une approche transversale et concertée de la prévention des risques chimiques et biologiques liés aux aérosols, selon une vision globale du cycle de vie de ces polluants, allant de leur production (la source) à l'exposition des salariés, en passant par les phénomènes de transfert dans les atmosphères de travail et dans les dispositifs de prélèvement.

- fraction alvéolaire (particules inhalées pénétrant au-delà des bronchioles non ciliées. Les particules d'un diamètre aérodynamique de 4 µm ont une probabilité de pénétration de 50 %).

Ce référentiel est distinct de celui utilisé dans le domaine de la santé environnementale reposant sur d'autres fractions particulaires [3], appelées PM_{10} et $PM_{2,5}$.

Les effets sanitaires des particules

L'inhalation est la principale voie d'exposition aux aérosols en milieu professionnel. Le passage cutané des particules est néanmoins possible, bien que moins étudié.
Les particules inhalées pénètrent plus ou moins en profondeur dans les voies respiratoires, principalement en fonction de leur taille. La fraction inhalée est de 100 % pour les particules de moins de 1 µm et diminue à mesure que leur diamètre augmente *(Cf. Figure 4, partie supérieure)*. Le dépôt des particules dans les régions extrathoracique, trachéobronchique et alvéolaire *(Cf. Figure 4, partie inférieure)*, est également déterminé par leur granulométrie. Il résulte de l'action combinée de plusieurs mécanismes tels que la sédimentation, l'impaction, l'interception, la diffusion, les effets électrostatiques.
Les particules plus grossières (> 1 µm) se déposent majoritairement dans la région extrathoracique. Pour les particules les plus fines, le dépôt est plus diffus sur l'ensemble des régions de l'appareil respiratoire. Le dépôt total est minimal pour les particules présentant un diamètre autour de 0,3 µm. Le dépôt des particules inhalées est donc inégal, dépendant de leur granulométrie, ce qui peut entraîner des doses localisées élevées. Or, le site de dépôt des particules conditionne leur devenir et participe à leurs effets sur la santé.

Une fois les particules déposées, différents mécanismes permettent leur élimination : la clairance mucociliaire permet une épuration rapide (de l'ordre de quelques heures) des particules déposées aux niveaux trachéobronchique et extrathoracique vers le carrefour aérodigestif, la clairance alvéolaire met en jeu des mécanismes lents et saturables pour éliminer les particules déposées au niveau du poumon profond.
La persistance des particules dans les voies respiratoires (ou biopersistance) peut engendrer une inflammation chronique et favoriser le développement de pathologies comme la fibrose ou le cancer. Par exemple, l'inhalation répétée de poussières de bois est à l'origine de cancers naso-sinusiens, probablement en raison d'un dépôt privilégié à ce niveau. L'accumulation de particules insolubles peut dépasser les capacités d'élimination du poumon profond, entraînant une inflammation et des

pathologies respiratoires de surcharge. Certaines particules migrent du poumon vers d'autres organes ou tissus (notamment *via* le système vasculaire ou lymphatique).
D'autres facteurs influencent le dépôt, l'élimination, la biopersistance et, *in fine,* la toxicité des particules : caractéristiques des particules (forme, surface spécifique, composition chimique, chimie de surface, solubilité, hygroscopicité, etc.), ou de la personne exposée (débit et mode respiratoires, antécédents respiratoires…).
Couplée à des paramètres respiratoires propres à chaque espèce, la distribution granulométrique permet d'estimer les doses réellement déposées. Elles jouent un rôle clé dans la précision des relations dose-effet, et sont indispensables pour extrapoler à l'homme les résultats d'études toxicologiques menées chez l'animal et établir des limites d'exposition fiables.

Les moyens de protection

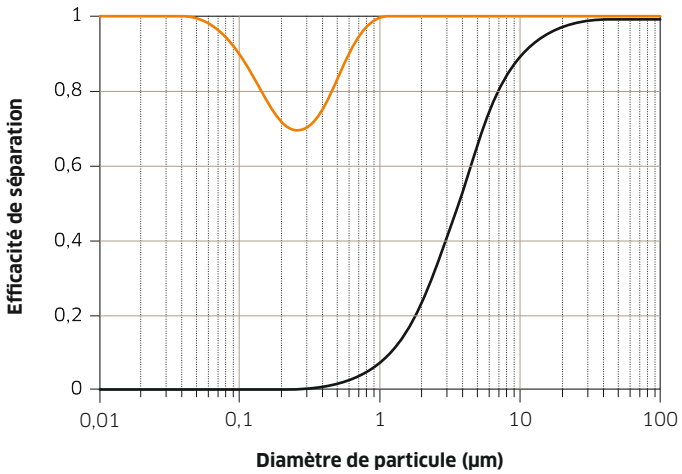
Les mesures de protection à déployer pour réduire l'exposition des salariés aux aérosols sont de deux types : collective ou individuelle.
Les moyens de protection collective (MPC) sont, par ordre de priorité de mise en œuvre décroissant :

- la réduction des émissions à la source (actions sur les produits utilisés ou sur le procédé) ;
- le confinement matériel (enceinte fermée, réacteur) ou immatériel (confinement dynamique réalisé par une enceinte ventilée ou par un captage inducteur) ;
- les moyens agissant directement sur l'air des locaux où évoluent les travailleurs, avec principalement la ventilation générale.

L'efficacité de la plupart des MPC est affectée par la distribution granulométrique des aérosols et celle-ci doit être prise en compte pour leur conception. Par exemple :

- l'inertie des particules (liée à leur taille) est une grandeur d'entrée pour le dimensionnement des vitesses d'aspiration des captages inducteurs et leur positionnement par rapport aux procédés émissifs ;
- les vitesses de transport des aérosols dans les conduits de ventilation doivent être ajustées pour éviter, ou au moins limiter, leur dépôt.

Les principaux systèmes d'épuration de l'air des lieux de travail (filtres à média fibreux, électrofiltres, colonnes à bulles, lits granulaires, laveurs, abattage humide) présentent toujours un minimum d'efficacité, généralement pour des tailles de particules comprises entre 0,1 µm et 0,5 µm (courbe en orange sur la *Figure 5)*. À l'inverse, les systèmes reposant sur la séparation inertielle des particules, comme les cyclones, voient leur efficacité diminuer avec le diamètre des particules, pour atteindre une valeur quasi nulle dans le domaine submicronique



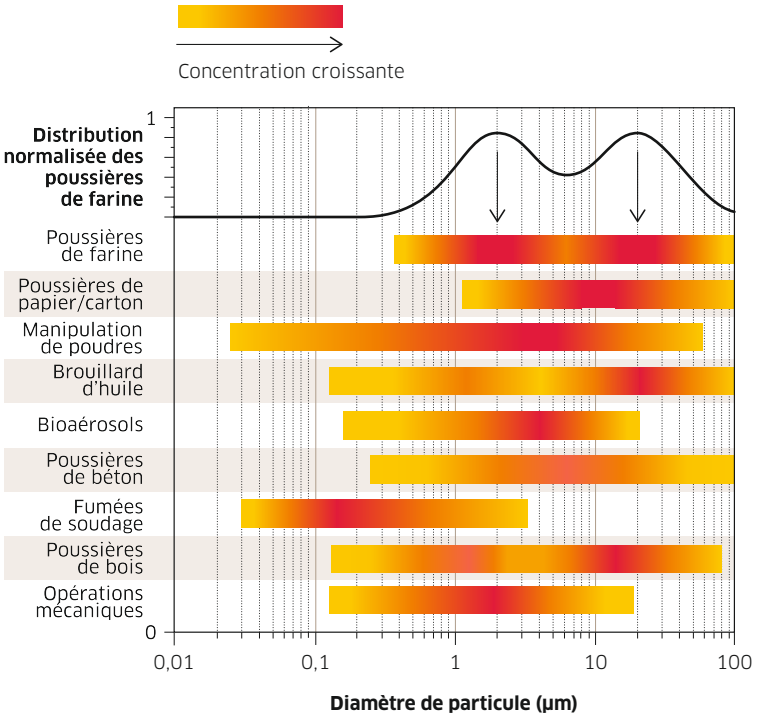
↑ **FIGURE 5**
Efficacité de séparation en fonction du diamètre des particules (sphériques et de densité 1).
En noir : cyclone, en orange : filtre à média fibreux.

(courbe noire sur la *Figure 5)*. Afin de déterminer l'efficacité de séparation d'un système vis-à-vis d'un aérosol, il est donc primordial de connaître sa distribution granulométrique.
Lorsque l'efficacité des MPC n'est pas suffisante, le port de protections individuelles est indispensable. Le choix d'un appareil de protection respiratoire (APR) repose sur l'analyse des risques au poste de travail et notamment, l'identification de la toxicité et de la concentration des aérosols présents dans l'atmosphère de travail. Le niveau de protection requis oriente vers l'APR le plus adéquat.
Comme pour les filtres de ventilation générale *(Cf. Figure 5)*, les filtres équipant les APR présentent un minimum d'efficacité. Ce minimum est observé pour une taille de particules appelée taille de particules la plus pénétrante, dépendant des propriétés structurelles et électrostatiques des filtres. Lors des essais de certification des filtres, les mesures d'efficacité de filtration sont réalisées dans la situation la plus défavorable, c'est-à-dire avec les particules les plus pénétrantes.
Enfin, la protection respiratoire globale d'un APR dépend de l'efficacité du filtre, mais aussi de l'étanchéité du masque au visage. En effet, le comportement des aérosols au niveau des éventuelles fuites entre le visage et le masque est similaire à celui du dépôt sur une surface, les particules submicroniques pénétrant plus facilement. Selon le modèle d'APR, un bon ajustement est indispensable pour garantir la protection respiratoire.

Conclusion : de quelles connaissances dispose-t-on ?

La diversité des aérosols pouvant être rencontrés en atmosphères professionnelles est présentée sur la *Figure 6 (page suivante),* par l'intermédiaire de quelques distributions granulométriques typiques. Elles sont représentées sous la forme de plage de taille couverte. L'échelle de couleur traduit leur proportion relative (exemple des poussières de

→



↑ FIGURE 6
Exemples de distributions granulométriques en nombre pouvant être rencontrées dans différentes atmosphères professionnelles.

farine en haut de la *Figure 6)*. Données à titre indicatif, elles démontrent la diversité en taille des particules présentes dans les atmosphères professionnelles et l'intérêt de la distribution granulométrique des aérosols dans le cadre de l'évaluation du risque chimique et biologique. Elle est utile aux acteurs de la prévention qui interviennent sur l'ensemble du cycle de vie d'un aérosol (émission des particules, captage, caractérisation des expositions, effets sur la santé, protection collective et individuelle, etc.).

Ces connaissances restent à compléter et il apparaît nécessaire de promouvoir la mesure systématique de la distribution granulométrique des aérosols présents dans les atmosphères professionnelles. Afin de progresser dans la réalisation de ces mesures et de les fiabiliser, différentes approches sont décrites dans la note technique publiée dans ce numéro de la revue *(Cf. NT 123, pp. 70-77)*. À terme, dans l'objectif de compléter la caractérisation des particules dispersées dans l'air des lieux de travail, d'autres propriétés pourraient également être documentées et capitalisées, telles que leur composition chimique/microbiologique ou leur potentiel oxydant associé. ●

1. Diamètre de la sphère de masse volumique 1 000 kg.m^{-3} ayant la même vitesse de sédimentation que la particule considérée.

2. Par exemple, si l'on souhaite mettre en évidence et/ou quantifier la fraction la plus fine, on choisira plutôt le nombre ; et si l'on souhaite faire le lien avec les fractions conventionnelles, plutôt la masse.

3. Cf. Code de l'environnement, article R. 221-1.

POUR EN SAVOIR +

• NORME NF EN 481 – *Atmosphères des lieux de travail – Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air.* Afnor, 1993 (indice de classement X 43-276). Accessible sur : https://www.boutique.afnor.org (site payant).

• ANSES – *Valeurs limites d'exposition en milieu professionnel – Poussières dites sans effet spécifique. Évaluation des méthodes de mesure (saisine n° 2017-SA-0148).* Anses, 2020. Accessible sur : www.anses.fr

• ANSES – *Analyse des fractions granulométriques utilisées pour l'évaluation des expositions par inhalation d'aérosols. Pertinence et comparaison des fractions environnementales (PM_{10}, $PM_{2,5}$) et professionnelles – inhalable, thoracique, alvéolaire (saisine 2018-SA-0076).* Anses, 2023. Accessible sur : www.anses.fr

• CLERC F. *ET AL.* – Dossier : la mesure des expositions aux agents chimiques : techniques et outils. *Hygiène & sécurité du travail,* 2021, 263, DO 33, pp. 18-43. Accessible sur : https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2033

• INRS – *Les valeurs limites d'exposition professionnelle.* ED 6443, 2022. Accessible sur : https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206443

• INRS – *Les appareils de protection respiratoire : Choix et utilisation.* ED 6106, 2020. Accessible sur : https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206106

• INRS – *Principes généraux de ventilation.* ED 695, 2022. Accessible sur : https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20695

• LECLERC J.P. *ET AL.* – Dossier : Poudres et poussières dans les procédés industriels : des enjeux pour la prévention. *Hygiène & sécurité du travail,* 2023, 272, DO 41, pp. 18-58. Accessible sur : https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2041

• INRS – *Prélèvement des aérosols : généralités.* In : *Guide méthodologique MétroPol,* 2025. Accessible sur : https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/guide-methodologique-metropol.html

• JUDON N. *ET AL.* – La charge physique et son influence sur les effets de l'exposition aux substances chimiques volatiles. In: Dossier – Risques multiples et polyexpositions : la prévention à l'épreuve de la complexité. *Hygiène & sécurité du travail,* 2021, 265, DO 35, pp. 32-44. Accessible sur : https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2035

• COSNIER F. *ET AL.* – Exposition cutanée et passage percutané : de quoi parle-t-on ? *Hygiène & sécurité du travail,* 2022, 269, DC 35, pp. 5-10. Accessible sur : https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC%2035