

Prélèvement des aérosols

Généralités

CONTEXTE

Après l'étape de préparation des mesures d'exposition (stratégie de prélèvement, préparation de l'intervention, etc.), des prélèvements d'aérosols peuvent être envisagés afin de mesurer dans l'air des expositions à des agents chimiques ou biologiques sous forme de particules. Ce document présente la méthodologie générale utilisée pour prélever un aérosol, et des informations communes à tous les dispositifs utilisés tant pour réaliser un prélèvement individuel qu'un prélèvement à point fixe.

Objectifs	2
Définition du terme aérosol	2
Principes d'un dispositif de prélèvement d'aérosol.....	3
Définitions des conventions et fractions utilisées en santé-travail.....	4
Grandeurs mesurables.....	6
Limites de détection et de quantification - temps de prélèvement	7
Performances - Biais - Incertitude globale.....	8
Bibliographie.....	12
Historique et auteurs.....	13
Contact	13

OBJECTIFS

Le prélèvement, ou échantillonnage, d'un aérosol est l'opération qui permet d'obtenir un échantillon de matière dispersée dans l'air sous forme de particules solides ou liquides, inorganiques, organiques ou biologiques. Cette opération peut répondre à plusieurs objectifs : déterminer les caractéristiques physico-chimiques ou biologique de l'aérosol en un point, mesurer l'évolution d'un ou de plusieurs paramètres au cours du temps, évaluer l'exposition de personnes à des substances nocives ou toxiques à un poste de travail particulier, ou l'exposition individuelle relative à des activités impliquant une certaine mobilité. L'évaluation de l'exposition implique, quand cela est possible, d'utiliser des méthodes individuelles de mesurage, fondées sur l'emploi de matériels portatifs permettant de réaliser une mesure dans la zone respiratoire du travailleur. On parlera alors de dispositifs de prélèvement individuel, par opposition aux dispositifs de prélèvement à point fixe [1]. Plusieurs prélèvements successifs peuvent être envisagés si la durée d'un prélèvement est limitée pour des raisons techniques, par exemple du fait d'un colmatage prématuré du support filtrant dans le cas de concentrations massiques importantes.

Les risques pour la santé dus à l'inhalation de particules en suspension dans l'air des lieux de travail dépendent de la nature des substances contenues dans les particules, de leur concentration dans l'air, et de la taille des particules qui conditionne en grande partie leur pénétration dans les voies respiratoires et leur dépôt à différents niveaux : voies aériennes supérieures (VAS), arbre trachéo-bronchique, alvéoles pulmonaires. L'évaluation des risques implique généralement l'échantillonnage d'une fraction spécifique de l'aérosol, en suivant les conventions d'échantillonnage explicitées dans la section « Définitions ».

Ce document présente la méthodologie générale utilisée pour prélever un aérosol, et les informations communes à tous les dispositifs utilisés tant pour réaliser un prélèvement individuel qu'un prélèvement à point fixe.

DEFINITION DU TERME AEROSOL

Un aérosol désigne tout ensemble de particules solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux. Les particules constituant un aérosol sont conventionnellement considérées comme en suspension si leur vitesse limite de chute maximale n'excède pas $0,25 \text{ m.s}^{-1}$. Dans l'air immobile, à la température de 20°C et à la pression de $101\,325 \text{ Pa}$, cette vitesse correspond sensiblement à celle atteinte par une sphère de diamètre de $100 \mu\text{m}$ et de masse volumique de 10^3 kg.m^{-3} .

Le terme générique « aérosol » peut ensuite être précisé en fonction du type de particules considérées.

Le terme « fumées » caractérise une dispersion de particules solides très fines résultant généralement de procédés thermiques, de phénomène de condensation en phase gazeuse, de réactions chimiques en phase gazeuse, etc. On parle par exemple de fumées de soudage ou de fumées de bitume.

Le terme « poussières » caractérise une dispersion de particules solides (submicroniques ou microniques) résultant généralement de procédés mécaniques, d'activité de manipulation de poudres ou encore de la remise en suspension depuis des surfaces de dépôt. On parle par exemple de poussières de bois, de poussières de farine, de poussières de ciment, etc.

Le terme « brouillards » caractérise une dispersion de particules liquides (gouttelettes) pouvant résulter de la condensation d'une vapeur, de la dispersion d'une phase liquide dans l'air, etc. On parle par exemple de brouillards d'huile.

Le terme « aérosols de NOAA » désigne des aérosols composés de nano-objets, leurs agrégats et agglomérats. Les aérosols de NOAA comprennent des structures présentant une, deux ou trois dimensions externes à l'échelle nanométrique, qui peuvent être des sphères, des fibres, des tubes et autres formes en tant que structures primaires. Les NOAA peuvent être constitués de structures primaires individuelles à l'échelle nanométrique et de structures agrégées ou agglomérées, y compris de tailles supérieures à 100 nm .

Le terme « bioaérosols » caractérise des aérosols constitués en tout ou partie d'entités d'origine biologique

telles que des cellules de bactéries, des spores bactériennes ou fongiques, des virus et d'autres composés microbiens (endotoxines, β -D-glucanes, mycotoxines, fragments de mycelium, métabolites, etc.). Pour en savoir plus, la rediffusion de la présentation « Introduction aux bioaérosols », issue de la Journée Technique « Bioaérosols au travail : mieux les comprendre pour mieux les prévenir » organisée par l'INRS en novembre 2024, peut être consultée (<https://www.youtube.com/watch?v=gSMZMucMa1s>).

PRINCIPES D'UN DISPOSITIF DE PRELEVEMENT D'AEROSOL

Un dispositif de prélèvement d'aérosol désigne un dispositif permettant de capter, de sélectionner les particules en suspension dans l'air (agents chimiques et/ou biologiques) et de les collecter sur un substrat de collecte. Un tel dispositif de prélèvement comprend généralement plusieurs parties distinctes ayant chacune leur fonctionnalité. L'aérosol est aspiré à travers un orifice ou une fente, qui assure le captage de l'aérosol ambiant, puis il est transporté jusqu'à un étage sélecteur ayant pour objet de trier les particules captées suivant leur taille. Cet étage sélecteur n'est présent que dans les dispositifs visant une fraction particulière de l'aérosol, généralement une sous-fraction de la fraction conventionnelle inhalable [2]. L'aérosol retenu est ensuite transporté jusqu'à un étage de collecte, qui peut être par exemple un filtre. Généralement, l'aérosol échantillonné correspond aux particules collectées sur ce support de collecte final.

Si les particules contiennent des substances volatiles, celles-ci peuvent subir une vaporisation partielle sur le support. Pour mesurer de telles substances, il convient d'utiliser soit dans la cassette, soit à l'intérieur d'un dispositif extérieur associé, un ou plusieurs substrats capables de fixer la phase vapeur (filtre imprégné de réactif, support adsorbant, etc.).

Les particules de l'aérosol subissent tout au long de leur transport, depuis l'air ambiant jusqu'à l'étage de collecte, une série d'évènements qui influent sur leur probabilité d'être échantillonnées effectivement sur le support final. Le mouvement des particules de l'aérosol au voisinage et à l'intérieur d'un dispositif de prélèvement est uniquement guidé par des paramètres physiques liés aux particules (taille, forme, densité), à la géométrie du dispositif de prélèvement et aux conditions aérauliques de son environnement immédiat (vitesse d'air extérieur, intensité de turbulence, etc.). L'aspiration des particules est elle-même sélective ; l'entrée effective des particules dans le dispositif de prélèvement à travers l'orifice (ou la fente) dépend en partie des forces de gravité (donc de leur poids) et des forces d'inertie liées à la fois à leur masse et à leur vitesse relative par rapport à la vitesse locale de l'air. Dans le cas d'un prélèvement individuel, au cours duquel le dispositif de prélèvement est positionné près des voies respiratoires supérieures d'une personne, la présence de la personne elle-même et plus particulièrement son thorax peuvent modifier l'aspiration des particules. En effet, le thorax représente un obstacle qui vient modifier le champ de vitesse de l'air au voisinage du dispositif de prélèvement. Cette influence semble plus faible pour des vitesses d'air inférieures à $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [3, 4]. Il en résulte qu'un dispositif conçu pour prélever une fraction conventionnelle d'un aérosol (notamment la fraction inhalable), en étant porté par un travailleur, peut conduire à des résultats différents que lorsqu'il est par exemple utilisé de manière isolée à point fixe. L'aspiration peut être responsable directement selon les cas d'une sous ou d'une surévaluation de la concentration de l'aérosol. Les bords de l'orifice peuvent aussi jouer un rôle secondaire en raison des phénomènes de rebond direct des particules qui y ont été précipitées au cours de l'aspiration et du réentraînement des particules déposées [5]. Ces phénomènes ne concernent que les particules solides. Le captage des particules par le dispositif de prélèvement résulte de la combinaison du phénomène d'aspiration et des effets de bord ou de paroi. A l'intérieur du dispositif de prélèvement et en dehors du sélecteur dont l'action est en principe relativement contrôlée, des différences de sélectivité peuvent cependant apparaître en fonction de la nature physique des particules présentes dans l'aérosol, la transmission des particules jusqu'à l'étage collecteur peut être incomplète en raison de dépôts sur les parois internes [6, 7].

L'aspiration de l'aérosol et son cheminement à l'intérieur du dispositif de prélèvement sont assurés au moyen d'une pompe externe ou interne. Le lecteur se rapportera, par exemple, aux fiches MétroPol suivantes pour mesurer le débit du dispositif de prélèvement et déterminer le volume d'air prélevé :

- <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-intervention-preparation/metropol-intervention-preparation.pdf>
- <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cassette/metropol-prelevement-cassette.pdf>

- <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cyclone/metropol-prelevement-cyclone.pdf>
- <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cip10/metropol-prelevement-cip10.pdf>

DEFINITIONS DES CONVENTIONS ET FRACTIONS UTILISEES EN SANTE-TRAVAIL

La norme européenne EN 481 [1] définit trois conventions d'échantillonnage des aérosols et trois fractions de particules dans le cadre de la problématique santé-travail. L'historique et le principe de ces conventions sont expliqués par ailleurs [8-9].

La **convention inhalable** correspond à la probabilité moyenne d'aspiration des particules en suspension dans l'air dans les voies respiratoires à travers le nez et la bouche pendant l'inhalation. Les paramètres moyennés sont la direction du vent extérieur et sa vitesse relative ($W < 4 \text{ m.s}^{-1}$), les paramètres anatomiques et respiratoires, ainsi que le mode de respiration (nasal ou buccal). Cette convention est généralement utilisée pour évaluer les risques liés à des substances toxiques solubles dans les fluides biologiques (salive, mucus bronchique, surfactant alvéolaire), capables de franchir relativement rapidement les parois et de passer dans le sang.

La **fraction inhalable** correspond à la fraction d'un aérosol constituée d'un pourcentage $I(D_{ae})$ des particules de l'aérosol initial défini par la fonction suivante :

$$I(D_{ae}) = 50 [1 + \exp(-0,06 \times D_{ae})] \quad \text{pour } D_{ae} \leq 100 \mu\text{m}$$

D_{ae} désigne le **diamètre aérodynamique** des particules. C'est le diamètre équivalent en vitesse limite de chute des particules. Il est défini comme étant le diamètre d'une sphère de masse volumique 10^3 kg.m^{-3} dont la vitesse limite de chute en air calme est identique à celle de la particule dans les mêmes conditions de pression, température et humidité relative. Le diamètre aérodynamique intègre à la fois la taille de la particule (et donc ses dimensions géométriques), sa densité et sa forme.

Ce paramètre est le seul paramètre de dimension des particules à considérer dans l'étude de leur mouvement relatif dans l'air en régime de Stokes et pour $D_{ae} > 0,3 \mu\text{m}$. Le régime de Stokes correspond au cas où, lorsqu'une particule sphérique de diamètre D est en mouvement relatif dans l'air, la force de traînée exercée par l'air sur la particule est proportionnelle à la vitesse relative V de la particule. Cette condition est vérifiée lorsque le nombre de Reynolds de la particule (égal à $D \times V \times \rho_f / \eta_f$, où ρ_f et η_f sont respectivement la masse volumique et la viscosité dynamique de l'air) est inférieur à 0,1. Les conditions d'écoulement au voisinage et à l'intérieur d'un dispositif de prélèvement vérifient, en règle générale, le régime de Stokes.

La **convention thoracique** correspond à la probabilité moyenne de pénétration des particules inhalées au-delà du larynx, c'est-à-dire dans les voies trachéo-bronchiques et dans le poumon profond. Son utilisation est envisagée dans les cas où le transfert des substances contenues dans les particules vers le sang à travers la paroi bronchique n'est pas négligeable, et lorsque les voies trachéo-bronchiques constituent une cible potentielle (développement de tumeurs bronchiques ou pleurales ou substances irritantes – H_2SO_4).

La **fraction thoracique** est une sous-fraction de la fraction inhalable d'un aérosol constituée d'un pourcentage des particules de la fraction inhalable défini par une fonction de distribution log-normale cumulée dont le diamètre aérodynamique médian est $11,64 \mu\text{m}$ et l'écart-type géométrique 1,5. Du fait de sa définition comme une sous-fraction de $I(D_{ae})$, il en résulte que le diamètre de coupure (correspondant à la probabilité de 50 %) par rapport à l'aérosol ambiant est de $10 \mu\text{m}$. La fraction thoracique d'un aérosol correspond à la probabilité moyenne d'inhalation et de pénétration dans les voies respiratoires au-delà du larynx pour une personne adulte.

La **convention alvéolaire** correspond à la probabilité moyenne de pénétration des particules inhalées dans les voies respiratoires non ciliées (bronchioles terminales et alvéoles pulmonaires). Elle s'adresse

particulièrement à des substances toxiques très peu solubles dans les fluides biologiques respiratoires (mucus bronchique, surfactant alvéolaire), mais qui compte tenu des mécanismes d'épuration cellulaires dans les espaces alvéolaires (phagocytose par les macrophages, transport des particules, solubilisation dynamique dans les lysosomes) et du temps de séjour beaucoup plus important que dans les voies bronchiques, peuvent diffuser lentement dans le sang. La convention alvéolaire s'adresse par ailleurs à certaines substances à pouvoir cytotoxique élevé (par exemple la silice cristalline) qui sont à l'origine de dommages irréversibles comme la fibrose pulmonaire [10].

La **fraction alvéolaire** est une sous-fraction de la fraction inhalable d'un aérosol constituée d'un pourcentage des particules de la fraction inhalable défini par une fonction de distribution log-normale cumulée dont le diamètre aérodynamique médian est $4,25 \mu\text{m}$ et l'écart type géométrique 1,5. Du fait de sa définition comme une sous-fraction de $I(D_{ae})$, il en résulte que le diamètre de coupure (correspondant à la probabilité de 50 %) par rapport à l'aérosol ambiant est de $4 \mu\text{m}$. La fraction alvéolaire d'un aérosol correspond à la probabilité moyenne d'inhalation et de pénétration dans les voies respiratoires non ciliées (bronchioles respiratoires, alvéoles) pour une personne adulte.

La norme internationale ISO 7708 [11] définit les mêmes fractions conventionnelles pour des vitesses d'air extérieur inférieures à 4 m.s^{-1} . Elle définit également, à titre indicatif, une relation empirique pour estimer la convention inhalable pour des vitesses d'air extérieur supérieures, comprises entre 4 et 9 m.s^{-1} .

Les conventions citées ci-dessus sont représentées graphiquement dans la Figure 1.

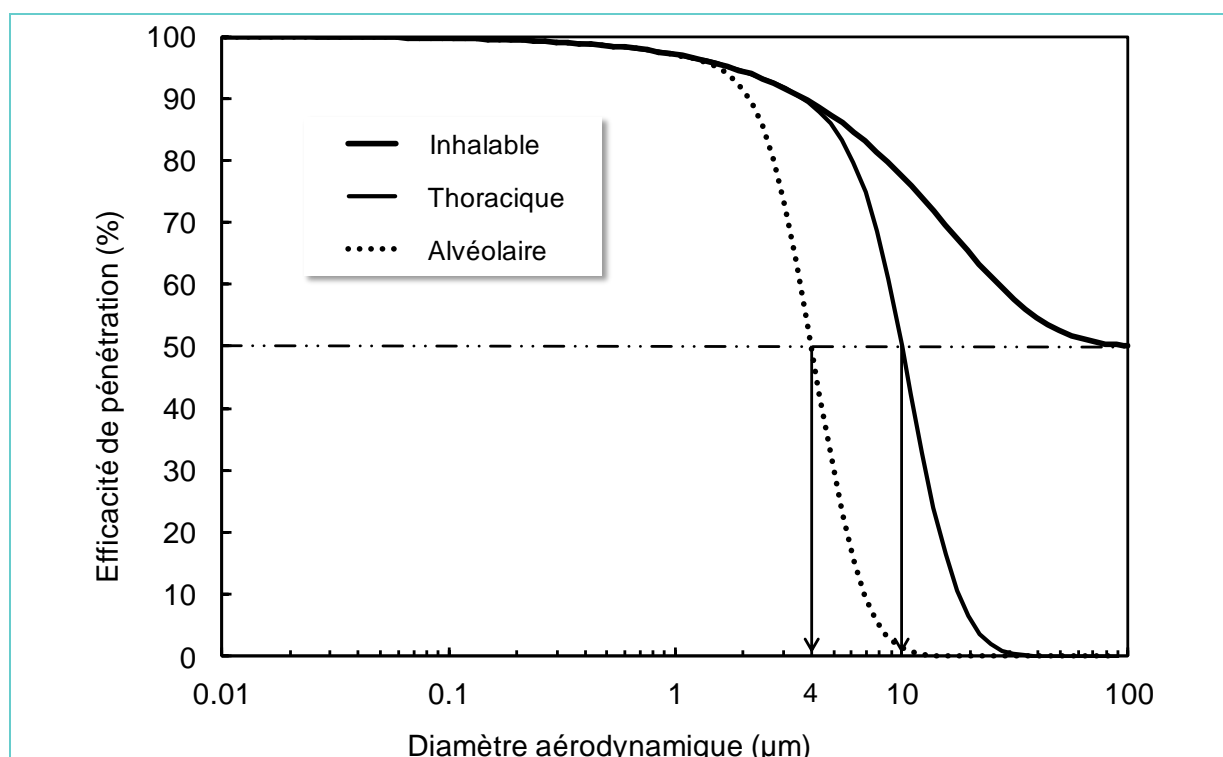


Figure 1 : Courbes conventionnelles CEN [1] définissant les fractions inhalable, thoracique et alvéolaire d'un aérosol en fonction du diamètre équivalent aérodynamique des particules.

Des études de terrain menées dans différents environnements de travail [12, 3] ont révélées que les vitesses d'air dans les atmosphères de travail sont en majorité relativement faibles, comprises entre $\sim 0,05$ et $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, avec une valeur médiane de $\sim 0,2 \text{ m.s}^{-1}$. La convention inhalable décrite dans la norme EN 481 n'étant pas cohérente avec ces vitesses d'air faibles, une nouvelle courbe d'inhalabilité en air calme pourrait être proposée dans le futur [13 à 17].

Le concept suivant lequel il serait plus pertinent d'intégrer un critère de mesure reposant sur le dépôt des particules dans un compartiment respiratoire plutôt que suivant un critère de pénétration, principe de base des conventions décrites plus haut et des normes EN 481 et ISO 7708, est de plus en plus partagé dans la communauté scientifique [18, 19]. Ce concept a pris de l'importance en raison de l'intérêt croissant porté aux effets des particules de taille nanométrique, leurs agrégats et agglomérats qui couvrent toute la gamme de taille comprise entre quelques nanomètres à plusieurs micromètres [20]. Bien qu'il n'existe pas encore de VLEP reposant sur le critère de dépôt, des documents de normalisation ont été élaborés [21, 22] ainsi que des approches de mesures proposées [23, 24].

Efficacité de captage : Probabilité pour qu'une particule, située en amont d'un dispositif de prélèvement dans l'écoulement non perturbé par sa présence et à l'intérieur de la surface limite contenant l'ensemble des lignes de courant convergeant vers l'orifice d'aspiration, traverse le plan de l'orifice et pénètre dans le dispositif de prélèvement. L'efficacité de captage E_{capt} dépend du diamètre aérodynamique des particules D_{ae} , de la géométrie du dispositif de prélèvement, de son voisinage et des conditions aérauliques externes.

Efficacité d'échantillonnage : Probabilité pour qu'une particule soit captée dans les conditions décrites précédemment et finalement collectée sur le support terminal du dispositif de prélèvement. L'efficacité d'échantillonnage E_{ech} est donc au plus égale à E_{capt} pour un diamètre aérodynamique de particule D_{ae} donné. La connaissance de cette fonction est essentielle pour apprécier les performances d'un dispositif de prélèvement ; elle peut être évaluée au laboratoire dans des conditions contrôlées [25].

GRANDEURS MESURABLES

Un système de prélèvement d'aérosols, fonctionnant au débit Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pendant un intervalle de temps Δt (s), va collecter une masse M (kg) de matière solide ou liquide (en supposant le liquide non volatil), qui peut se déduire de la relation suivante :

$$M = C \times Q \times \Delta t$$

où C désigne la concentration moyenne pondérale ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) de la fraction d'aérosol échantillonnée au cours de l'intervalle de temps Δt . Habituellement, on utilise d'autres unités que les unités SI pour les grandeurs fondamentales : masse, longueur et temps, et la relation précédente doit alors être écrite avec des coefficients déterminés, par exemple :

$$M = 10^{-3} \times C \times Q \times \Delta t$$

avec M en (mg), C en ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), Q en ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$) et Δt en (min).

Le volume d'air prélevé est égal au produit :

$$V = Q \times \Delta t$$

On peut être amené à s'intéresser à d'autres grandeurs que la masse de matière particulaire collectée. On peut par exemple exprimer la concentration de l'aérosol en nombre de particules par unité de volume d'aérosol C_N (m^{-3}), ou relativement à une propriété telle que par exemple la surface des particules (S), leur volume (V), leur activité (A) si les particules contiennent des substances radioactives, ou encore la masse d'une substance particulière (i) contenue dans les particules de l'aérosol. Dans tous ces cas, on peut faire correspondre à la grandeur choisie pour mesurer la quantité de matière collectée, une concentration C_N (m^{-3}), C_S ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$), C_V ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), C_A ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$), C_{Mi} ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$).

LIMITES DE DETECTION ET DE QUANTIFICATION - TEMPS DE PRELEVEMENT

La méthode d'analyse consécutive au prélèvement doit permettre de trouver une estimation de la masse M , ou de toute autre propriété des particules collectées, avec son incertitude globale (<https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-resultat-calcul-incertitude/metropol-resultat-calcul-incertitude.pdf>). Il est aussi possible de calculer un estimateur de l'écart-type s_M portant sur la détermination d'une masse de substance collectée à partir de tests de reproductibilité relatifs à l'analyse. Ce paramètre ne traduit que les erreurs aléatoires de mesurage (ici d'analyse), et ne permet en aucun cas de rendre compte d'éventuelles erreurs systématiques. La limite de détection LD_M de la quantité M est choisie de manière conventionnelle :

$$LD_M = 3 \times s_M$$

On peut en déduire le temps de prélèvement minimal qui correspond à cette limite :

$$\Delta t_1 \geq \frac{3 \times s_M}{C \times Q}$$

On définit aussi de manière conventionnelle la limite de quantification de la méthode d'analyse (<https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-resultat-calcul-incertitude/metropol-resultat-calcul-incertitude.pdf>) :

$$LQ_M = 10 \times s_M$$

Le temps minimal de prélèvement correspondant à cette limite est :

$$\Delta t_2 \geq \frac{10 \times s_M}{C \times Q}$$

Pour des méthodes d'analyse d'une ou plusieurs substances spécifiques contenues dans l'échantillon collecté, on peut généralement évaluer en termes de masses une limite de détection LD_{Mi} et une limite de quantification LQ_{Mi} pour chaque substance (i). Les limites de détection LD_i et de quantification LQ_i en termes de concentrations dans l'air sont :

$$LD_i = LD_{Mi} / V$$

$$LQ_i = LQ_{Mi} / V$$

Exemple numérique

Supposons que l'analyse du support de collecte de l'aérosol, un filtre par exemple, consiste à évaluer la masse des particules collectées par pesée. On peut fixer des valeurs pour s_M et pour la concentration C :

$s_M = 10 \mu\text{g}$ (voir également la fiche du guide méthodologique [Analyse gravimétrique](#) pour plus de précision sur la méthode de calcul de la limite de détection, de la limite de quantification et de l'intervalle de confiance pour l'analyse gravimétrique)

$C = 150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (dans la fraction alvéolaire)

Supposons que l'on utilise un dispositif de prélèvement individuel de la fraction alvéolaire dont le débit nominal est de $1,7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Les temps limites de prélèvement seront respectivement pour la limite de détection et pour la limite de quantification :

$$\Delta t_1 = \frac{3 \times 10}{150 \times 1,7 \times 10^{-3} / 60} / 3600 \approx 2 \text{ h}$$

$$\Delta t_2 \approx 6 \text{ h } 32 \text{ min}$$

PERFORMANCES - BIAIS - INCERTITUDE GLOBALE

Un dispositif de prélèvement d'aérosol, placé dans un certain environnement pour lequel son efficacité d'échantillonnage est une fonction connue du diamètre aérodynamique des particules $E_{ech}(D_{ae})$, mesurera une concentration pondérale C_{ech} d'une substance particulière ou de la globalité de la matière collectée suivant la relation suivante :

$$C_{ech} = C \int_0^{\infty} f_M(D_{ae}) \times E_{ech}(D_{ae}) \times d \ln(D_{ae})$$

où $f_M(D_{ae})$ désigne la fonction de distribution de la masse de la substance incriminée (ou des particules), et C la concentration de la même substance dans l'aérosol.

Remarque

L'équation précédente est valable dans le cas où le paramètre qu'on cherche à mesurer est la concentration massique d'une substance. Dans le cas où l'on voudrait s'intéresser à une autre propriété de l'aérosol, comme par exemple la concentration des particules en nombre ou en surface, il suffirait alors de remplacer $f_M(D_{ae})$ par son équivalent en nombre $f_N(D_{ae})$ ou $f_S(D_{ae})$.

Si le dispositif de prélèvement est normalement conçu pour prélever dans ces conditions une des fractions conventionnelles définies par la fonction $E^*(D_{ae})$, son efficacité d'échantillonnage réelle $E_{ech}(D_{ae})$ peut différer légèrement de $E^*(D_{ae})$. Un appareil "idéal" mesurerait exactement la fraction conventionnelle de l'aérosol suivant la relation suivante :

$$C^* = C \int_0^{\infty} f_M(D_{ae}) \times E^*(D_{ae}) \times d \ln(D_{ae})$$

L'écart relatif entre la concentration mesurée et la concentration de la fraction conventionnelle est appelé le biais [25] :

$$\Delta = \frac{C_{ech} - C^*}{C^*}$$

Le biais varie avec la distribution granulométrique de l'aérosol. La norme européenne EN 13205 [25] prévoit de calculer une carte des valeurs du biais pour une série de distributions log-normales d'aérosols, en faisant varier le diamètre aérodynamique médian en masse MMAD, par exemple entre 1 et 25 μm , et l'écart-type géométrique GSD, par exemple entre 1,5 et 3,5.

La connaissance, même approximative, de la distribution $f_M(D_{ae})$ de l'aérosol permet donc de déduire la valeur du biais correspondant à l'échantillonnage. On peut recommander de ne pas utiliser la technique envisagée si le biais est en valeur absolue supérieur à 20 %.

La norme européenne EN 13205 [25] prévoit que le biais du mesurage de la concentration d'aérosol ne doit pas dépasser $\pm 10\%$ à l'intérieur du domaine granulométrique correspondant à la fraction spécifiée. A titre d'information, l'indice BPC (Bias Performance Criterion) indique le pourcentage de points satisfaisant le critère $\pm 10\%$ sur une carte de biais. En d'autre terme, c'est le nombre de distributions d'aérosols d'une carte pour lesquels le biais de mesurage est acceptable, sur le nombre total d'aérosols dans la carte. Les aérosols quasi monodispersés étant peu fréquents dans l'industrie, seules les distributions avec un écart-type géométrique $GSD \geq 2$ sont prises en compte pour le calcul de l'indice de performance BPC.

La norme EN 13205 [25] sur les performances d'un dispositif de prélèvement prévoit de déterminer l'incertitude globale OU (pour "Overall Uncertainty") du processus complet de mesurage incluant le prélèvement et l'analyse. Le calcul est fondé sur l'application de la norme européenne EN 482 [26] :

$$OU (\%) = 100 \times (|\text{biais}| + 2 \times RSD)$$

où $|\text{biais}|$ est la valeur absolue de la différence relative entre la concentration mesurée et la concentration de référence, c'est à dire :

$$\text{biais} = \frac{C_{\text{ech}} - C^*}{C^*}$$

Le biais global est la résultante du biais lié à l'échantillonnage (Δ) et du biais analytique $\text{biais}_{\text{analyse}}$:

$$(1 + \text{biais}) = (1 + \Delta) \times (1 + \text{biais}_{\text{analyse}})$$

C_{ech} désigne la valeur mesurée de la concentration échantillonnée. RSD^2 désigne l'imprécision globale de la procédure de mesurage, correspondant aux fluctuations des paramètres de mesurage (granulométrie de l'aérosol, etc.), du débit, et des paramètres de l'analyse. Ce terme, qui est une variance, peut être décomposé de la façon suivante :

$$\text{RSD}^2 = \text{RSD}_{\text{ech}}^2 + \text{RSD}_Q^2 + \text{RSD}_{\text{analyse}}^2$$

où :

$$\text{RSD}_{\text{ech}}^2 = \frac{\sigma^2(C_{\text{ech}})}{C_{\text{ech}}^2} = \left(\frac{1}{1 + \Delta} \right)^2 \times \sigma_{\Delta}^2$$

$$\text{RSD}_Q^2 = \frac{\sigma^2(Q)}{Q^2}$$

$$\text{RSD}_{\text{analyse}}^2 = \frac{\sigma^2(M_{\text{analyse}})}{M_{\text{analyse}}^2}$$

Les termes $\text{RSD}_{\text{ech}}^2$, RSD_Q^2 et $\text{RSD}_{\text{analyse}}^2$ représentent les contributions à la variance dues au processus de prélèvement, à la variabilité du débit et à l'analyse, respectivement. Le terme M_{analyse} désigne ici la quantité de substance collectée sur le support et dosée au moyen de la technique d'analyse choisie.

Exemple d'application

Supposons que l'on ait à mesurer la concentration massique de la fraction alvéolaire conventionnelle d'un aérosol à l'aide d'un dispositif de prélèvement qualifié, c'est à dire pour lequel on connaît l'ensemble des cartes d'écarts (biais d'échantillonnage Δ). Supposons que le temps d'échantillonnage cumulé soit fixé ($\Delta t = 16$ heures), le débit à $1,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, et supposons que la masse de matière échantillonnée soit déterminée par pesée directe du filtre de collecte sans biais ($\text{biais}_{\text{analyse}} = 0$), avec une reproductibilité représentée par l'écart-type $s_M = 10 \mu\text{g}$.

Trois situations peuvent maintenant être envisagées. La première (cas A) correspond au cas où l'on connaît parfaitement la granulométrie de l'aérosol à échantillonner. Cette circonstance peut survenir si l'on mesure ce paramètre en parallèle avec la concentration de l'aérosol, en utilisant par exemple un impacteur en cascade. La deuxième situation (cas B) correspond à la situation inverse de la précédente, c'est-à-dire celle pour laquelle on ne dispose d'aucune information sur la granulométrie de l'aérosol. Ce cas est très courant en pratique. Enfin le dernier cas (cas C) correspond à une situation intermédiaire pour laquelle on connaît approximativement certaines valeurs limites du diamètre médian et de l'écart-type géométrique de la distribution de la masse des particules en fonction de leur diamètre aérodynamique. Cette connaissance peut résulter de mesurages antérieurs. On fait l'hypothèse dans cette application numérique que les aérosols mesurés sont approximativement monomodaux (la fonction de distribution de la masse des particules présente un seul maximum) avec une fonction de distribution log-normale.

Pour l'ensemble des cas on peut fixer certaines valeurs des paramètres communs :

$$\sigma(Q)/Q = 5\% \text{ (correspond à une incertitude globale de } 10\%)$$

d'où :

$$\text{RSD}_Q = 0,05$$

Remarque

On peut rappeler que la norme EN 13205, reprenant la norme EN 13137 [27], retient une erreur maximale tolérée de 5 %. En admettant que cette circonstance se produise dans 99,9 % des cas, cela conduit à une valeur beaucoup plus optimiste de l'écart-type relatif égale à 0,05 / 3.

$$\sigma(M_{\text{analyse}}) = S_M = 10 \mu\text{g}$$

Les variables Δ et σ_{Δ}^2 peuvent être calculées à partir des paramètres caractérisant la distribution granulométrique de l'aérosol et la fonction d'efficacité d'échantillonnage. Ces calculs exploitent notamment les données acquises en laboratoire. Dans le cas d'une distribution log-normale les paramètres sont au nombre de deux : le diamètre médian MMAD et l'écart-type géométrique GSD. Le principe général du calcul a été publié [28] et fait l'objet d'une norme [29].

Cas A (granulométrie parfaitement connue)

On peut calculer exactement la concentration conventionnelle à partir de la concentration mesurée et du biais d'échantillonnage Δ . Supposons que pour cette granulométrie de l'aérosol le biais soit de -10 % et que la masse d'échantillon collecté sur le filtre soit égale à 147 μg . On en déduit :

$$M_{\text{ech}} = 147 \mu\text{g}$$

$$\Delta = -0,10$$

$$C_{\text{ech}} = M_{\text{ech}} / (Q \times \Delta t) = 147 / (1,7 \times 10^{-3} \times 16 \times 60) = 90 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$C^* = C_{\text{ech}} / (1 + \Delta) = 100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (\text{concentration corrigée})$$

Supposons que l'écart-type sur le biais σ_{Δ} fourni par le logiciel soit égal à 3 % :

$$\sigma_{\Delta} = 0,03$$

$$\text{RSD}_{\text{ech}} = \frac{1}{1 + \Delta} \times \sigma_{\Delta} = \frac{0,03}{1 - 0,10} = 0,0333$$

On peut calculer la variance globale du résultat (C^*) à partir des différentes contributions liées à l'échantillonnage (variabilité du biais), au débit et à l'analyse :

$$\text{RSD}^2 = \text{RSD}_{\text{ech}}^2 + \text{RSD}_Q^2 + \text{RSD}_{\text{analyse}}^2$$

$$\text{RSD}^2 = (0,0333)^2 + (0,05)^2 + (10/147)^2$$

d'où : $\text{RSD} = 0,0908$

L'intervalle de confiance du résultat au niveau 95 % est :

$$\text{IC}(C^*) = C^* \times (1 \pm 2 \times \text{RSD})$$

soit : $\text{IC}(C^*) = 100 \pm 18 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

L'intervalle de confiance est symétrique en raison de la correction due au biais connu Δ . Rappelons que le résultat de mesurage de la concentration apparente ('vue' par le dispositif de prélèvement) est $C_{\text{ech}} = 90 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Son intervalle de confiance ne fait intervenir que les variances liées au débit et à l'analyse :

$$\text{RSD}^2(C_{\text{ech}}) = \text{RSD}_Q^2 + \text{RSD}_{\text{analyse}}^2$$

$$\text{RSD}^2(C_{\text{ech}}) = (0,05)^2 + (10/147)^2$$

d'où : $\text{RSD}(C_{\text{ech}}) = 0,0844$

$$\text{IC}(C_{\text{ech}}) = 90 \pm 15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$$

Cas B (granulométrie inconnue)

On ne peut pas cette fois déterminer le biais d'échantillonnage pour l'aérosol prélevé avec le dispositif choisi. Ce biais inconnu est par contre contenu à l'intérieur de certaines limites qu'on peut estimer en balayant le spectre granulométrique utile de l'aérosol. Un tel spectre est prévu dans le projet de norme EN 13205 pour chaque convention d'échantillonnage (inhalable, thoracique et alvéolaire) dans le cas d'un aérosol à distribution log-normale. Il est donc possible de calculer pour un ensemble de distributions discrètes des paramètres granulométriques les valeurs de Δ et σ_{Δ} . Pour chaque distribution de cet ensemble (indice i) on peut calculer, comme dans le cas A, l'intervalle de confiance $IC_i(C_i^*)$. Si la densité de probabilité de la distribution de l'aérosol à mesurer est identique sur l'ensemble du spectre, la valeur minimale de l'intervalle $IC_i(C_i^*)$ que l'on peut déterminer pour chaque distribution représente la valeur ayant la probabilité 95 % d'être dépassée par la concentration conventionnelle C^* . De la même manière, la valeur maximale de l'intervalle $IC(C^*)$ représente la valeur ayant la même probabilité de ne pas être dépassée. L'intervalle de confiance du résultat (concentration de la fraction conventionnelle) est donc :

$$IC_{MIN} = \text{MIN}[IC_i(C_i^*)] \quad i = 1, n$$

$$IC_{MAX} = \text{MAX}[IC_i(C_i^*)] \quad i = 1, n$$

Remarque

Les valeurs minimale et maximale ainsi obtenues ne correspondent pas forcément aux valeurs minimale et maximale du biais Δ en raison de la variation de σ_{Δ} dans le domaine granulométrique. Cette occurrence peut notamment se produire lorsque la valeur absolue du biais est faible sur l'ensemble du domaine.

Dans le cas de l'exemple relatif à la fraction alvéolaire, le spectre granulométrique généralement rencontré sur les lieux de travail s'étend approximativement

$$\text{de } MMAD_{MIN} = 1 \mu\text{m} \quad \text{à} \quad MMAD_{MAX} = 25 \mu\text{m}$$

$$\text{de } GSD_{MIN} = 1,5 \quad \text{à} \quad GSD_{MAX} = 3,5$$

pour un total de 225 distributions discrètes.

Imaginons par exemple que les valeurs minimale et maximale de $IC_i(C_i^*)$ correspondent respectivement à des granulométries conduisant aux valeurs suivantes de Δ et σ_{Δ} :

$$\Delta_1 = + 0,08 \quad \Delta_2 = - 0,20$$

$$\sigma_{\Delta 1} = 0,03 \quad \sigma_{\Delta 2} = 0,05$$

On peut calculer les éléments suivants :

$$RSD_{ech,1} = 0,03 / (1 + 0,08) = 0,0278$$

$$RSD_{ech,2} = 0,05 / (1 - 0,20) = 0,0625$$

$$RSD_1 = [(0,0278)^2 + (0,05)^2 + (10/147)^2]^{0,5} = 0,0889$$

$$C_1^* = 90 / (1 + 0,08) = 83,33 \mu\text{g.m}^{-3}$$

$$IC_{MIN} = C_1^* \times (1 - 2 \times RSD_1) = 68,52 \mu\text{g.m}^{-3}$$

$$RSD_2 = [(0,0625)^2 + (0,05)^2 + (10/147)^2]^{0,5} = 0,1050$$

$$C_2^* = 90 / (1 - 0,20) = 112,50 \mu\text{g.m}^{-3}$$

$$IC_{MAX} = C_2^* \times (1 + 2 \times RSD_2) = 136,13 \mu\text{g.m}^{-3}$$

L'intervalle de confiance de la concentration conventionnelle C^* (résultat de mesure) est donc l'intervalle :

$$IC = 69 - 136 \mu\text{g.m}^{-3}$$

Cet intervalle est généralement dissymétrique par rapport à la valeur mesurée $C_{ech} = 90 \mu\text{g.m}^{-3}$. La symétrie

autour de la valeur mesurée est retrouvée comme condition limite si le biais d'échantillonnage est nul partout dans le domaine granulométrique et si l'écart-type $\sigma\Delta$ qui caractérise sa variabilité est constant.

Cas C (domaine de granulométrie estimé approximativement)

Ce cas constitue une variante du cas précédent. Si l'on a de bonnes raisons de restreindre le domaine de granulométrie probable de l'aérosol à mesurer, il est alors logique d'appliquer le calcul de $IC_{MIN} = \text{MIN}[IC_i(C_i^*)]$ et de $IC_{MAX} = \text{MAX}[IC_i(C_i^*)]$ à ce seul domaine. La procédure est tout à fait identique à la précédente, et conduit à un intervalle de confiance du résultat moins étendu.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF EN 1540 (X43-287). Décembre 2021. Exposition sur les lieux de travail – Terminologie. La Plaine-Saint-Denis, AFNOR, 37 p.
- [2] NF EN 481 (X43-276). Novembre 1993. Atmosphères des lieux de travail - Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air. La Plaine Saint-Denis, AFNOR, 11 p.
- [3] P.E.J. Baldwin, A.D. Maynard (1998) A survey of wind speeds indoor workplaces. *Ann. Occup. Hyg.*, 42, 303-13.
- [4] P. Görner, X. Simon, R. Wrobel, E. Kauffer, O. Witschger (2010) Laboratory study of selected inhalable aerosol samplers. *Ann. Occup. Hyg.*, 54, 165-187.
- [5] J.H. Vincent. (1989) *Aerosol sampling - Science and Practice*. J. Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- [6] M. Demange, J.C. Gendre, B. Hervé-Bazin, B. Carton, A. Peltier (1990) Aerosol evaluation difficulties due to the particle deposition on filter holder inner walls. *Ann. Occup. Hyg.*, 34, 399-403.
- [7] J.H. Vincent (2005) Health-related aerosol measurement: a review of existing sampling criteria and proposals for new ones. *J. Environ. Monit.*, 2005, 7, 1037-1053.
- [8] P. Görner, J. Fabriès (1996) Industrial aerosol measurement according to the new sampling conventions. *Occupational Hygiene*, 3, 361-376.
- [9] Anses. (2023). Analyse des fractions granulométriques utilisées pour l'évaluation des expositions par inhalation d'aérosols. Pertinence et comparaison des fractions environnementales - PM10, PM2,5 - et professionnelles - inhalable, thoracique, alvéolaire-. (saisine 2018-SA-0076). Maisons-Alfort : Anses, 28 p.
- [10] P.F. Holt (1987) *Inhaled dust and disease*. J. Willey & Sons Inc., New York, USA, 325 p.
- [11] NF ISO 7708 (X 43-100). Mai 1996. Qualité de l'air - Définitions des fractions de taille des particules pour l'échantillonnage lié aux problèmes de santé. La Plaine Saint-Denis, AFNOR, 9 p.
- [12] R.D. Berry, S. Froude (1989) An investigation of wind conditions in the workplace to assess their effect on the quantity of dust inhaled, U.K. Health and Safety Executive Report IR/L/DS/89/3. London: Health and Safety Executive.
- [13] R.J. Aitken, P.E.J. Baldwin, G.C. Beaumont, L. C. Kenny, A. D. Maynard. Aerosol inhalability in low air movement environments. *J. Aerosol Sci.* 1999, 30, 613-626.
- [14] D. K. Sleeth, J. H. Vincent. Proposed modification to the inhalable aerosol convention applicable to realistic workplace wind speeds. *Ann. Occup. Hyg.*, 2011, 55, 476-484.
- [15] Brown, J. S. (2005). Particle inhalability at low wind speeds. *Inhalation Toxicology* 17 (14), 831-837.
- [16] Cox, A. L., Handy, R. G., Thiese, M. S., and Sleeth, D. K. (2019). Development of an empirical formula for describing human inhalability of airborne particles at low wind speeds and calm air. *Annals of Work Exposures and Health* 63, 1046-1060.
- [17] Anthony, T. R., and Anderson, K. R. (2015). An empirical model of human aspiration in low-velocity air using CFD investigations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 12, 245-255.

- [18] D.L. Bartley, J.H. Vincent (2011) Sampling conventions for estimating ultrafine and fine aerosol deposition in the human respiratory tract. *Ann. Occup. Hyg.*, 55, pp. 696-709.
- [19] O. Witschger (2007) Inhalation et dépôt dans les voies respiratoires. Dans : *Les Nanoparticules – Un enjeu majeur pour la santé au travail ?* EDP Sciences 2007, pp.191-217.
- [20] O. Witschger, O. Le Bihan, M. Reynier, C. Durand, A. Marchetto, E. Zimmermann, D. Charpentier (2012) Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux. *Hygiène et Sécurité du Travail*, 226, 41-55.
- [21] FD ISO/TR 27628 (février 2007) Air des lieux de travail — Particules ultrafines, nanoparticules et aérosols nanostructurés — Caractérisation et évaluation de l'exposition par inhalation. 38 p.
- [22] NF EN ISO 13138: Mai 2012. Qualité de l'air - Conventions de prélèvement de particules aéroportées en fonction de leur dépôt dans les voies respiratoires humaines. 17 p.
- [23] K.Elihn, P. Berg, G. Liden (2013) Correlation between airborne particle concentrations in seven Industrial plants and estimated respiratory tract deposition by number, mass and elemental composition. *J. Aerosol Sci.*, 42, 127-141.
- [24] L. G. Cena, M. J. Keane, W. P. Chisholm, S. Stone, M. Harper, and B. T. Chen (2014) A Novel Method for Assessing Respiratory Deposition of Welding Fume Nanoparticles. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11, 771–780
- [25] NF EN 13205. (X 43-283). 2014. Exposition sur les lieux de travail – Evaluation des performances des dispositifs de prélèvement pour le mesurage des concentrations de particules en suspension dans l'air. La Plaine Saint-Denis, AFNOR, Partie 1 à Partie 6.
- [26] NF EN 482 (X 43-277). Mars 2021. Exposition sur les lieux de travail - Procédures pour déterminer la concentration d'agents chimiques - Exigences élémentaires relatives aux performances La Plaine Saint-Denis, AFNOR, 24 p.
- [27] NF EN ISO 13137 (X 43-282). Octobre 2022. Air des lieux de travail - Pompes pour le prélèvement individuel des agents chimiques et biologiques - Exigences et méthodes d'essai. La Plaine Saint-Denis, AFNOR, 31 p.
- [28] J.F. Fabriès, P. Görner, R. Wrobel (2002) Assessment of confidence limits for the concentration of conventional health-related aerosol fractions. *Sixth International Aerosol Conference, Taipei, Taiwan, September 9-13*, pp. 229-230.
- [29] FD CEN/TR 15547 (X 43-284) Mars 2007. Atmosphères des lieux de travail – Calcul de la concentration en fractions d'aérosols liées à la santé à partir de la concentration mesurée à l'ait d'un dispositif de prélèvement ayant des caractéristiques de performance connues. La Plaine Saint-Denis, AFNOR, 14 p.

HISTORIQUE ET AUTEURS

Version	Date	Modifications	Auteurs / Contributeurs
1	Octobre 2015	Création de la fiche	P. Görner, X. Simon, O. Witschger
2	Mai 2025	Révision éditoriale, ajout de la section « Définition du terme aérosol » et mise à jour des références normatives	X. Simon

CONTACT

INRS, Métrologie des polluants (metropol@inrs.fr)