

Prélèvement des aérosols par cyclone

OBJECTIFS

Cette fiche décrit une méthode de prélèvement d'un aérosol soit en fraction alvéolaire, soit en fraction thoracique par un dispositif de prélèvement de type cyclone. La définition de ces fractions conventionnelles est donnée par les normes EN 481 [1] et ISO 7708 [2]. Un exemple d'utilisation de la méthode est le mesurage en individuel de l'exposition d'un travailleur à des polluants particuliers renfermant une substance pour laquelle il existe une valeur limite d'exposition professionnelle relative à la fraction alvéolaire ou à la fraction thoracique.

Principe de fonctionnement d'un cyclone	2
Exemples de cyclones	3
Montage et utilisation d'un cyclone	5
Mesure du débit d'un cyclone.....	6
Montage par connexion directe sur l'entrée du cyclone	7
Montage avec une boîte étanche de calibration	7
Autres montages pour la mesure du débit des cyclones Dorr-Oliver et Dust cyclone	8
Calcul de la concentration en particules dans l'air	10
Performances des cyclones.....	10
Cyclone Dorr-Oliver	11
Cyclone GS-1	14
Cyclone Higgins-Dewell.....	14
Dust cyclone.....	15

Cyclone GS-3.....	15
Cyclone GK2.69.....	16
Cyclone GK4.162 (Rascal)	18
Comparaison des cyclones dans les atmosphères professionnelles.....	21
Bibliographie	21
Auteur.....	23
Historique	23

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN CYCLONE

Un cyclone est un dispositif de séparation des particules d'un aérosol en fonction de leur diamètre aérodynamique D_{ae} (Figure 1). Le cyclone permet de réaliser une classification en taille des particules et a pour objectif de sélectionner une fraction des particules présentes dans l'atmosphère de travail.

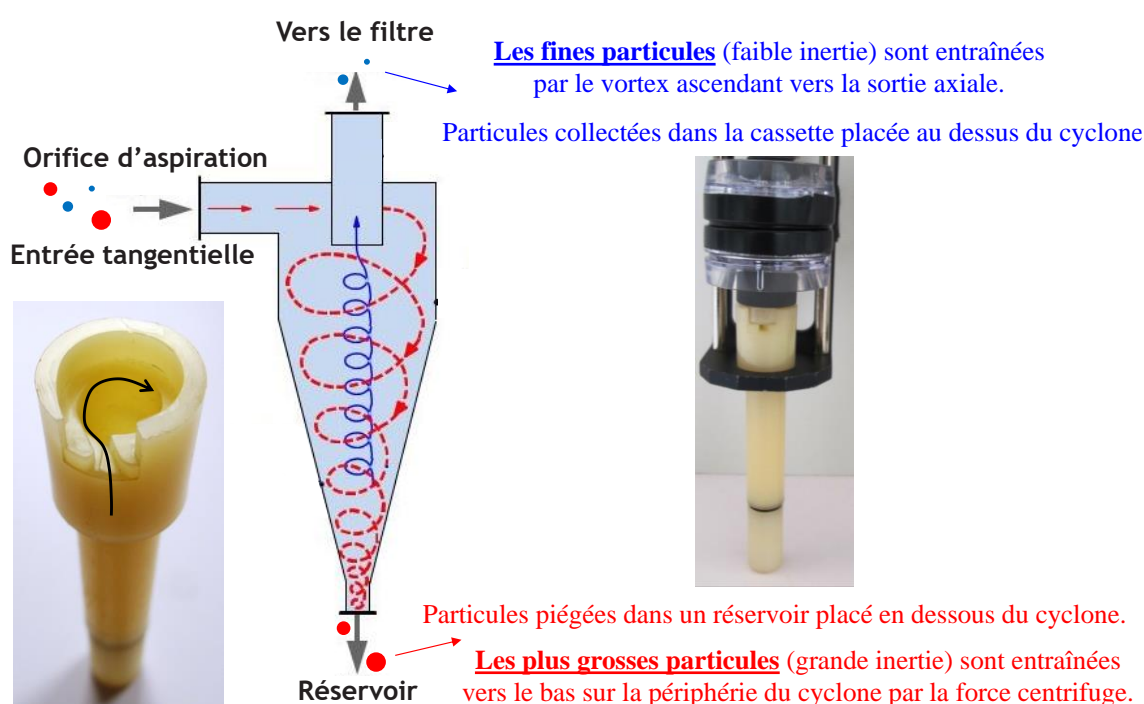


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'un cyclone. Photos d'illustration avec un cyclone Dorr-Oliver

Les particules pénètrent dans le cyclone de façon tangentielle pour ensuite subir un mouvement circulaire à l'intérieur du cyclone. Les plus grosses particules, de grande inertie, sont entraînées sur la périphérie interne du cyclone par la force centrifuge. Elles se retrouvent finalement piégées en partie basse du cyclone, dans un réservoir prévu à cet effet (Figure 1), et ne font pas partie de l'échantillon.

Les fines particules, de plus faible inertie, s'éloignent moins de l'axe du cyclone et sont entraînées par un vortex ascendant vers une sortie axiale située en partie supérieure du cyclone. Elles sont collectées dans un dispositif porte-filtre telle qu'une cassette (étage terminal de filtration) et constituent ainsi l'échantillon de matière à analyser [3].

En santé du travail, les cyclones sont principalement dimensionnés pour réaliser le prélèvement de la fraction conventionnelle alvéolaire d'un aérosol. La probabilité qu'a une particule entrant dans le cyclone de le traverser jusqu'à l'étage collecteur est une fonction décroissante du diamètre aérodynamique ; elle est principalement caractérisée par son diamètre de coupure, d_{50} , qui correspond au diamètre pour lequel l'efficacité de pénétration du cyclone est égale à 50% (Figure 2). Ainsi, un cyclone dédié au prélèvement de la fraction alvéolaire d'un aérosol devra idéalement présenter un diamètre de coupure proche de $4 \mu\text{m}$.

La pente de la courbe d'efficacité d'échantillonnage est liée aux paramètres géométriques du cyclone. Le débit du cyclone est un facteur permettant de modifier le diamètre de coupure sans influencer de manière sensible sur la forme de la courbe. Pour un type de cyclone donné, aux caractéristiques géométriques bien précises, la valeur du débit doit donc être optimisée pour atteindre un diamètre de coupure défini.

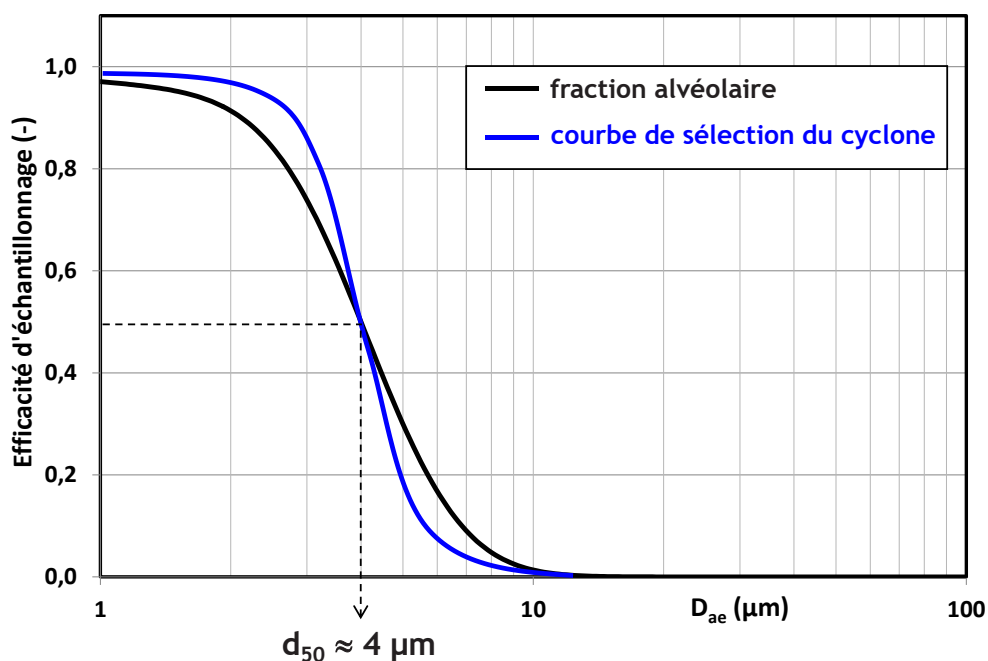


Figure 2 : Exemple de courbe de sélection d'un cyclone (d_{50} = diamètre de coupure)

EXEMPLES DE CYCLONES

De nombreux cyclones sont disponibles commercialement pour réaliser le prélèvement des aérosols. Le Tableau 1 présente un nombre restreint, non exhaustif, de dispositifs utilisés en France. Les fabricants ou revendeurs de ces dispositifs peuvent facilement être identifiés en réalisant par exemple une requête sur

un moteur de recherche en utilisant comme mots clés : cyclone + 'modèle de cyclone'.

Parmi les différents modèles de cyclones utilisés pour réaliser des mesures de l'exposition des travailleurs aux aérosols par prélèvement individuel, certains (GK 2.69 et GK 4.162) permettent de cibler alternativement la fraction alvéolaire ou la fraction thoracique par modification de leur débit d'aspiration. Cette faculté à prélever les polluants particulaires visés par la fraction alvéolaire (poussières sans effet spécifique, silice cristalline, fumées diesel, aérosols de nanomatériaux, etc.) ou ceux visés par la fraction thoracique (fibres végétales, aérosol d'acide sulfurique) peut constituer un atout pour les utilisateurs et les gestionnaires de parcs métrologiques.

Les abaissements des niveaux de concentrations dans l'air des lieux de travail, d'une part, et des valeurs limites d'exposition professionnelles, d'autre part, tendent à renforcer le besoin de recourir à des débits de prélèvement les plus élevés possibles pour augmenter la quantité de matière collectée dans l'échantillon sur la durée d'une tâche ou d'un poste de travail.

Modèle de cyclone	Photo	Débit (L.min ⁻¹)	Fraction alvéolaire	Fraction thoracique
Dorr-Oliver		1,7	X	
GS-1		2,0	X	
Higgins-Dewell		2,2	X	
Dust cyclone		2,5	X	
GS-3		2,75	X	
GK 2.69		Alvéolaire : 4,2 Thoracique : 1,6	X	X
GK 4.162		Alvéolaire : 8,5 Thoracique : 3	X	X

Tableau 1 : Exemples de cyclones pour le prélèvement des aérosols dans les atmosphères de travail. Classement par débits de prélèvement croissants pour cibler la fraction alvéolaire. Tous les cyclones présentés peuvent être équipés avec des filtres de 25 mm ou de 37 mm de diamètre, à l'exception du cyclone GK 4.162 qui ne fonctionne qu'avec des filtres de 47 mm.

MONTAGE ET UTILISATION D'UN CYCLONE

Parmi les cyclones présentés dans le Tableau 1, le cyclone Dorr-Oliver est le seul qui doit être assemblé avec une cassette fermée (25 ou 37 mm suivant le besoin, deux pièces ou trois pièces suivant la version – illustré en Figure 1). La liaison entre le cyclone et la cassette doit être étanche. Le cyclone Higgins-Dewell est quant à lui le seul à disposer d'un porte-filtre qui lui soit spécifiquement dédié (vendu avec le dispositif, réutilisable et disponible en version 25 ou 37 mm – illustré en Figure 3a). Tous les autres cyclones disposent de pièces d'adaptation qui permettent d'assembler des cassettes ouvertes de 25 ou 37 mm (illustré en Figures 3b à 3d). L'étanchéité de l'assemblage est assurée par des joints toriques, dont il convient de vérifier périodiquement le bon état. Dans tous les cas, il est nécessaire de se reporter à la notice de montage délivrée par le fournisseur.

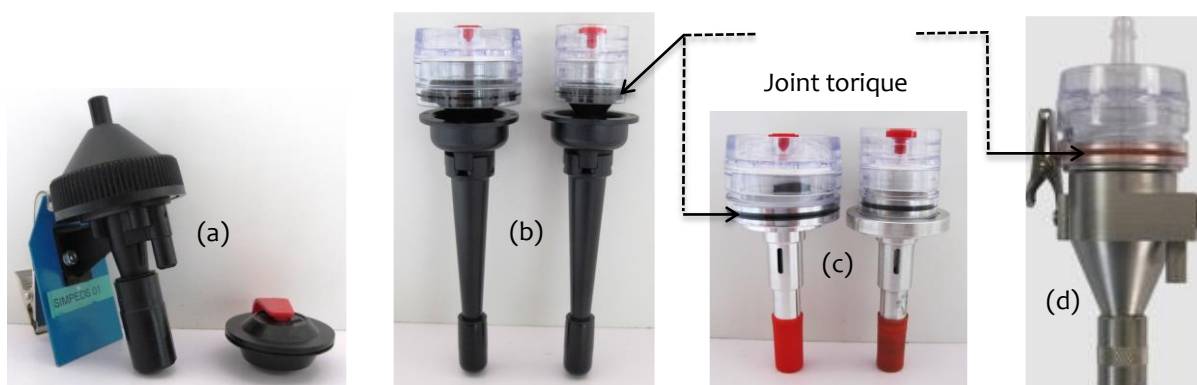


Figure 3 : Photographies d'illustration de plusieurs cyclones : (a) le cyclone Higgins-Dewell et son porte-filtre dédié ; (b) les cyclones GS1 ou GS3 ; (c) le Dust cyclone et (d) le cyclone GK 2.69

La nature et les caractéristiques techniques du filtre de prélèvement (par exemple membrane polycarbonate, membrane en acétate ou en mélange d'esters de cellulose, membrane en PVC ou en PTFE, filtre en microfibres de verre ou de quartz, etc.) devront être compatibles avec le type d'analyse envisagé. En fonction de la nature et de l'épaisseur du filtre, un tampon support en fibres de cellulose pourra être utilisé. La préparation et l'assemblage des cassettes doivent se conformer aux mêmes protocoles et vérifications que ceux explicités dans les fiches « Préparation du matériel en vue d'une intervention en entreprise » [4] et « Prélèvement des aérosols par cassette fermée » [5]. L'étanchéité entre les différentes pièces de la cassette pourra ainsi être vérifiée ; dans tous les cas, il reste indispensable de veiller à l'enfoncement complet et régulier sur toute la circonférence de ces pièces jusqu'en butée. A noter que cette dernière précaution d'assemblage est également valable pour les cyclones dont l'étage de collecte est constitué d'une cassette ouverte (par exemple, GS1, GS3, Dust cyclone ou GK 2.69 sur la Figure 3).

Pour le prélèvement individuel d'un aérosol, le cyclone est fixé dans la zone respiratoire du travailleur [6] et relié à une pompe de prélèvement fixée sur l'opérateur et qui satisfait les exigences de la norme NF EN ISO 13137 (X 43-282) [7]. Lors de la mesure, il est conseillé de maintenir le corps du cyclone dans la position verticale et l'orifice d'entrée du cyclone orienté vers l'avant. Le débit nominal de prélèvement peut varier d'un dispositif à l'autre (Tableau 1), en fonction des géométries interne et externe de chaque appareil ou encore, de la fraction ciblée. La variation du débit de prélèvement ne doit pas dépasser une tolérance de ± 5 % du débit nominal du cyclone, au cours de l'échantillonnage. La durée de prélèvement sera à déterminer au regard de l'objectif de mesure ; la pompe devra être capable de fonctionner à débit régulé et sans interruption sur cette durée.

Quel que soit l'objectif d'échantillonnage visé, une surveillance en vue de noter (et éventuellement de réparer) d'éventuels incidents pendant la durée d'échantillonnage est souhaitable : état des tubes flexibles, orientation de l'orifice du cyclone, fonctionnement de la pompe, chute du cyclone ou de la pompe, etc.

La manipulation des cyclones et de leurs cassettes, en début et en fin de prélèvement, doit se faire de manière à ne pas contaminer l'échantillon. En cours et en fin de prélèvement, il est par exemple important de ne pas retourner le cyclone tant que le porte-filtre est solidaire de l'ensemble. Une partie des grosses

particules, piégées en bas du cyclone dans le réservoir et qui ne font pas partie de la fraction visée, pourrait en effet migrer vers la cassette de prélèvement et rendre inexploitable l'échantillon prélevé. En fin de prélèvement, désolidariser précautionneusement le porte-filtre du cyclone en évitant les chocs ou les gestes brusques (et toujours en veillant à ce que le cyclone ne se retourne pas). Les filtres doivent ensuite être transportés dans leurs cassettes de prélèvement ; les cassettes doivent être correctement fermées avec des bouchons et, si possible, maintenues en position verticale (surface de collecte des particules orientée vers le haut) pour minimiser un éventuel transfert de particules collectées sur le filtre vers les parois internes de la cassette.

Entre deux mesures, le réservoir de grosses particules doit être vidé et nettoyé. Le corps du cyclone doit quant à lui être lavé périodiquement et au minimum avant chaque nouvelle intervention.

MESURE DU DEBIT D'UN CYCLONE

Le débit doit être mesuré et noté avant (Q_1) et après le prélèvement (Q_2) [8]. Le volume d'air échantillonné, V , est calculé sur la base du débit moyen, Q , et de la durée d'échantillonnage, t :

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad V = Q \times t$$

La durée de prélèvement devra être choisie par le préleveur en fonction des objectifs d'échantillonnage. Dans le cas de la mesure de l'exposition d'un travailleur, la durée de prélèvement doit être représentative de la durée du poste de travail et sera idéalement d'environ 8 heures.

Les cyclones sont des dispositifs particulièrement sensibles à une modification de leur débit de prélèvement. Lorsque le débit réel s'éloigne du débit nominal de fonctionnement du cyclone, la courbe d'efficacité d'échantillonnage et le diamètre de coupure associé sont modifiés et le prélèvement n'est plus représentatif de la fraction visée. La Figure 4 illustre les deux conséquences possibles d'un écart au débit nominal Q d'un cyclone représentatif de la fraction alvéolaire. Un débit trop élevé ($Q_1 > Q$) va augmenter la sélectivité des particules, décaler la courbe d'efficacité d'échantillonnage vers les plus petits diamètres et entraîner une sous-estimation de la concentration massique qui ne sera plus représentative de la fraction alvéolaire. A l'inverse, un débit trop faible ($Q_2 < Q$) va diminuer la sélectivité des particules, décaler la courbe d'efficacité d'échantillonnage vers les plus grands diamètres et entraîner une surestimation de la concentration massique qui ne sera plus représentative de la fraction alvéolaire.

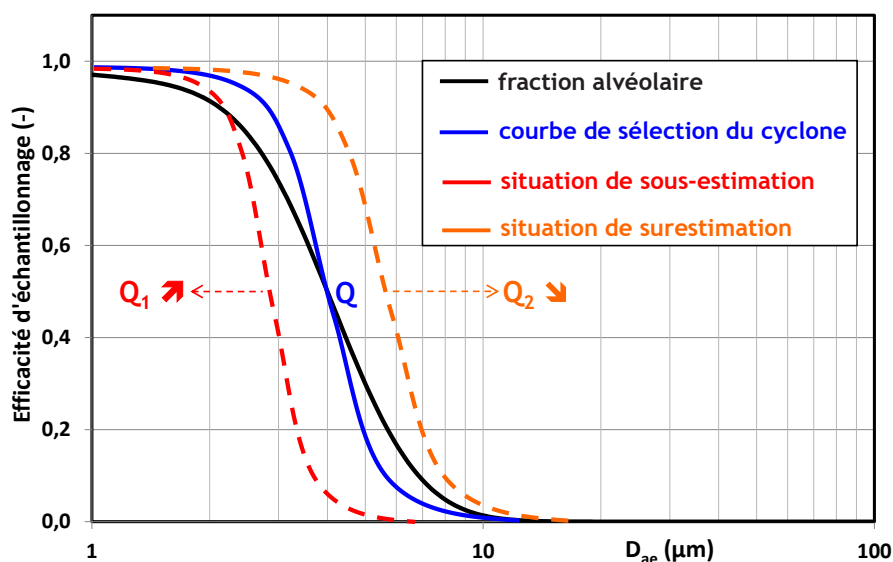


Figure 4 : Influence du débit de prélèvement d'un cyclone sur son efficacité d'échantillonnage

En toute rigueur, l'ensemble du dispositif (cyclone + porte-filtre) doit être inclus dans le montage permettant la mesure du débit de prélèvement. Il est par ailleurs nécessaire d'utiliser un débitmètre présentant une très faible perte de charge. Un débitmètre, étalonné et vérifié, est préconisé (électronique à lame de savon, massique thermique ou équivalent).

MONTAGE PAR CONNEXION DIRECTE SUR L'ENTREE DU CYCLONE

Pour les cyclones Higgins-Dewell, GK 2.69 ou GK 4.162, l'orifice d'entrée peut être facilement connecté à un débitmètre pour réaliser le montage de la Figure 5.

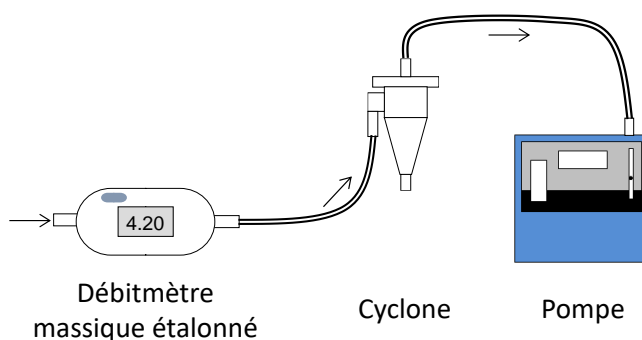


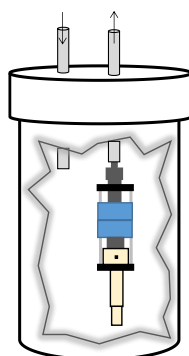
Figure 5 : Montage préconisé pour la mesure du débit de prélèvement des cyclones Higgins-Dewell, GK 2.69 ou GK 4.162 et rendu possible du fait de la géométrie de leurs entrées

MONTAGE AVEC UNE BOÎTE ETANCHE DE CALIBRATION

Pour les autres cyclones, Dorr-Oliver, GS1, GS3, Dust cyclone, la géométrie des entrées ne permet pas de connecter directement, de manière étanche, un débitmètre. Il est alors possible de mesurer le débit d'un cyclone dans son ensemble en utilisant une boîte étanche, comme proposé sur le montage de la Figure 6.



Préparation du montage avec un cyclone Dorr-Oliver et un débitmètre massique thermique.



Montage finalisé avec un débitmètre électronique à lame de savon. Le cyclone n'est pas visible car disposé à l'intérieur de la boîte étanche.

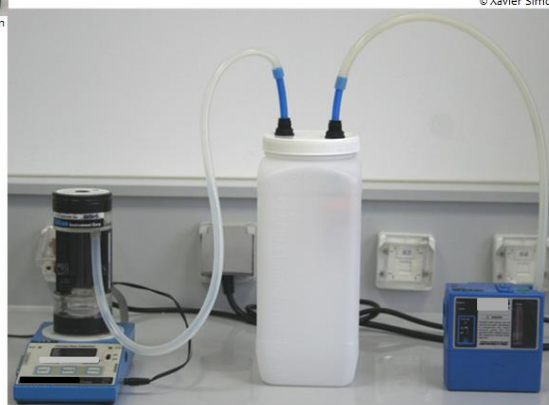


Figure 6 : Exemples de montages avec une boîte étanche de calibration pour la mesure du débit de prélèvement d'un cyclone

AUTRES MONTAGES POUR LA MESURE DU DEBIT DES CYCLONES DORR-OLIVER ET DUST CYCLONE

Pour le cyclone Dorr-Oliver qui utilise une cassette fermée comme étage de collecte, la vérification du débit du dispositif de prélèvement peut s'effectuer à l'aide d'un débitmètre connecté à l'entrée de la cassette (Figure 7). En faisant l'hypothèse que le filtre utilisé est responsable d'une perte de charge nettement supérieure à celle du cyclone, le débit peut être mesuré suivant le schéma de la Figure 7, n'impliquant pas le cyclone. Ce montage n'est, en revanche, pas préconisé pour les cyclones GS1, GS3, Dust cyclone qui utilisent une cassette ouverte connectée au cyclone.

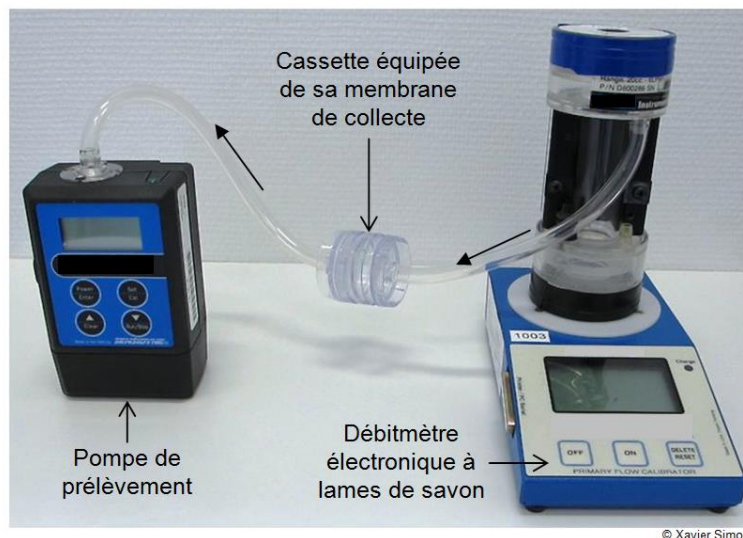


Figure 7 : Montage possible pour la mesure du débit de prélèvement d'une cassette fermée servant d'étage de collecte dans un cyclone Dorr-Oliver

Une pièce d'adaptation est vendue avec le Dust cyclone afin de faciliter la prise de débit (Figure 8). Cette dernière vient recouvrir de manière étanche le cyclone pour permettre une connexion facilitée d'un débitmètre en amont du dispositif.

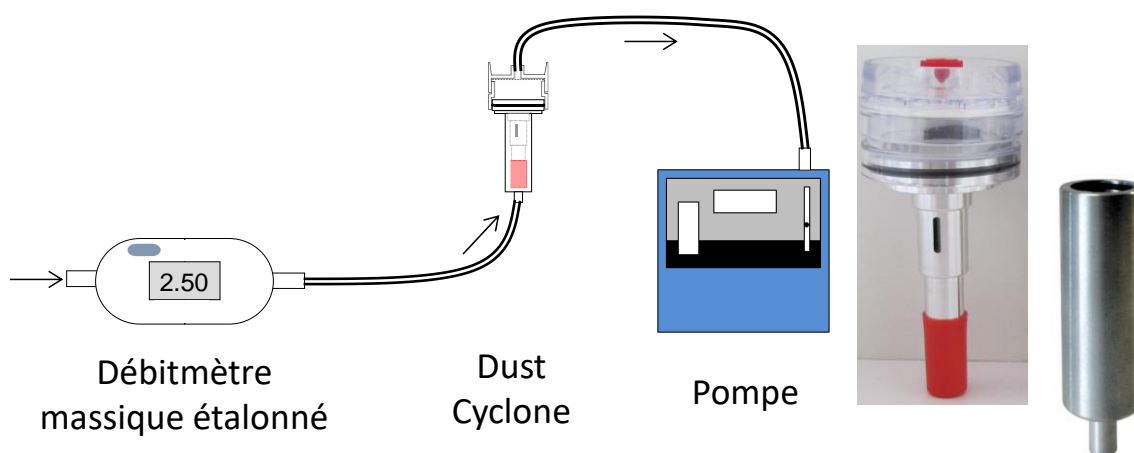


Figure 8 : Montage possible pour la mesure du débit de prélèvement d'un Dust cyclone

Des essais de comparaison menés à l'INRS avec une pompe Gilair 3 (Gilian) et des cyclones équipés de filtres de 37 mm en PVC (diamètre de pore 5 μm) ont permis d'établir qu'il n'y avait pas de différence supérieure à $\pm 1\%$ dans la mesure des débits suivant les configurations suivantes :

Cyclone Dorr-Oliver 1,7 L.min⁻¹ : 'montage avec boîte étanche' vs. 'montage avec cassette seule'

Dust cyclone 2,5 L.min⁻¹ : 'montage avec boîte étanche' vs. 'montage avec pièce d'adaptation'

CALCUL DE LA CONCENTRATION EN PARTICULES DANS L'AIR

Dans le cas d'une analyse de la masse de l'échantillon par méthode gravimétrique, la concentration massique en particules dans l'air se calcule de la manière suivante :

$$C_M = \frac{\Delta M}{V}$$

Avec, C_M : concentration massique en particules dans l'air (mg/m^3) ;

ΔM : masse de particules prélevée sur le support de collecte (mg) ;

V : volume d'air échantillonné pendant le prélèvement (m^3) ;

La détermination de la masse de particules prélevées ΔM se fait par différence entre la masse du support de collecte vierge et sa masse après prélèvement, selon la méthode [M-278](#) de la base de données MétroPol. Les variations de masse induites par l'évolution des conditions hygrométriques (entre pesées initiales et pesées après prélèvement) ou par la manipulation des supports de collecte, sont compensées par celles des supports de collecte servant de blancs de terrain.

Dans le cas d'une analyse de la masse de l'échantillon par une méthode autre que la gravimétrie, la concentration dans l'air de la substance se calcule de la manière suivante :

$$C_X = \frac{\Delta X}{V}$$

Avec, C_X : concentration dans l'air de la substance ;

ΔX : quantité de la substance prélevée et analysée sur le support de collecte ;

V : volume d'air échantillonné pendant le prélèvement (m^3) ;

Les polluants particuliers pouvant être prélevés par cyclone sont diversifiés (poussières en fraction alvéolaire ou thoracique, quartz, silice cristalline, particules diesel, fibres, etc.) ; il est donc nécessaire de se référer à la fiche MétroPol de la substance visée pour vérifier l'ensemble du protocole de mesure et le mode de calcul de la concentration dans l'air.

PERFORMANCES DES CYCLONES

Les données expérimentales disponibles dans la littérature tendent à montrer que les performances des cyclones présentés dans le Tableau 1 sont satisfaisantes vis-à-vis de la fraction alvéolaire. Pour un même cyclone, les résultats sont le plus souvent concordants entre différents laboratoires d'essais, utilisant différentes méthodes de mesures et différents aérosols tests.

Tous les cyclones présentent une courbe de sélection semblable à celle présentée sur la Figure 2 : la pente de la courbe d'efficacité d'échantillonnage d'un cyclone est généralement plus élevée que celle de la courbe conventionnelle de la fraction alvéolaire. Cette tendance est confirmée par les résultats de la Figure 9 qui présentent, à titre d'exemples, les efficacités d'échantillonnage de plusieurs cyclones. On remarque tout d'abord que les points expérimentaux ne s'éloignent que rarement de plus de 20% de la fraction alvéolaire. Leur sélectivité conduit d'une part, à une légère surestimation pour les particules de diamètres aérodynamiques compris entre environ 1,5 et 4 μm et d'autre part, à une légère sous-estimation pour les particules de diamètres aérodynamiques compris entre environ 4 et 10 μm .

Remarque : Les particules échantillonnées dans un porte-filtre à l'aval d'un cyclone peuvent se déposer sur les parois internes de la cassette [9, 10]. Ces éventuels dépôts sont encore mal évalués, probablement très variables en fonction de l'aérosol prélevé, du cyclone ou du filtre utilisé et du matériau constitutif de la

cassette porte-filtre. Les dépôts sont a priori non prédictibles. Les performances des cyclones actuellement disponibles ne tiennent généralement pas compte de ce possible phénomène de dépôt. Toutefois, lorsque le protocole de préparation de l'échantillon prend en compte la récupération des dépôts sur les parois de la cassette, l'ensemble des particules sélectionnées par le cyclone est alors analysé. Une sous-estimation des concentrations peut éventuellement exister lorsque le filtre seul est analysé, sans qu'il soit possible en l'état actuel des connaissances de préciser les conséquences d'un tel artefact. Enfin, Soo *et al.* [10] ont montré que l'utilisation de cassettes en polypropylène (matériau noir conducteur favorisant la dissipation des charges électrostatiques) permettait de réduire significativement la fraction massique de quartz déposée sur les parois par rapport à des cassettes en polystyrène (matériau transparent) et ce, pour plusieurs cyclones. Ce résultat encourageant mériterait d'être vérifié sur d'autres natures d'aérosols.

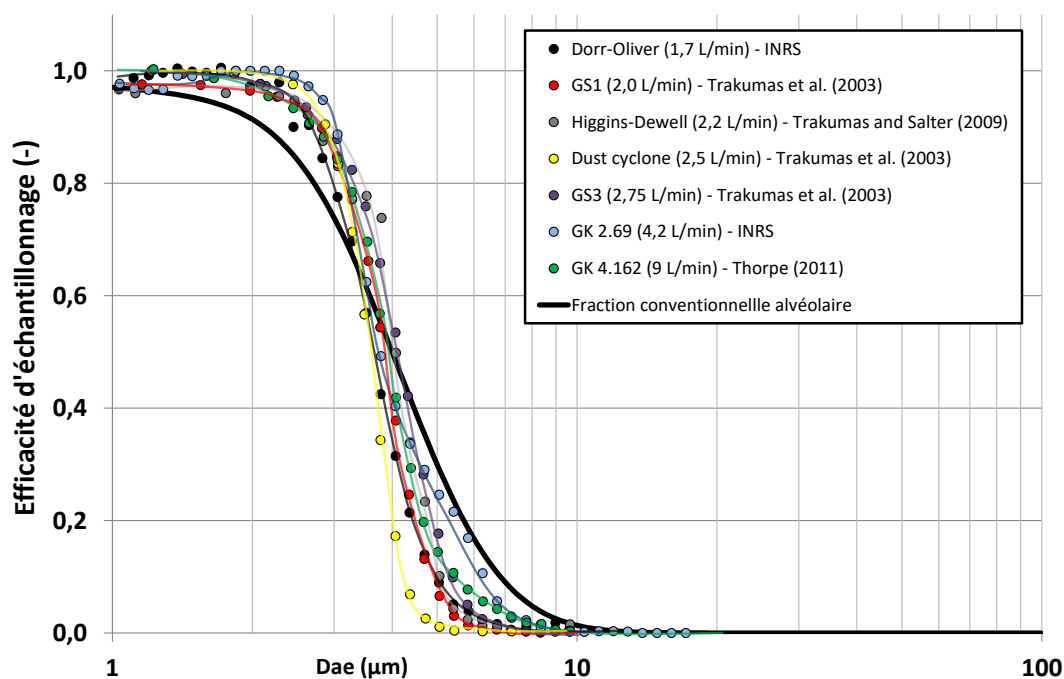


Figure 9 : Comparaison des efficacités d'échantillonnage de plusieurs cyclones vis-à-vis de la fraction alvéolaire. Exemples illustratifs choisis arbitrairement.

CYCLONE DORR-OLIVER

Le cyclone Dorr-Oliver (Figure 10) est conçu pour assurer la sélection de la fraction alvéolaire d'un aérosol. Cette méthode de prélèvement fait l'objet de la norme NF X43-259 [11].

Le dispositif complet comprend les éléments suivants :

- Cyclone 10 mm nylon Dorr-Oliver (Figure 10), présentant un orifice de captage carré et de dimensions 2,5 mm × 2,5 mm, débit nominal le plus souvent rencontré 1,7 L.min⁻¹.
- Cassette porte-filtre (Figure 10) pour filtres de Ø 37 ou 25 mm.
- Dispositif porte-cyclone pour réaliser un prélèvement individuel (Figure 10).
- Filtre de prélèvement (suivant l'analyse envisagée).
- Pompe de prélèvement à un débit stabilisé de 1,7 L.min⁻¹ ± 5 %.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

A l'origine, le sélecteur de particules que représente le cyclone 10 mm Dorr-Oliver a été développé pour cibler une précédente convention « alvéolaire » définie par les documents ISO TR 7708 (1983) [12] et ACGIH

(1985) [13]. Dans la convention alvéolaire actuelle [1, 2], la forme analytique des courbes et de leur diamètre de coupure ont été modifiés : ainsi, l'ancienne convention présentait un diamètre de coupure égal à $3,5 \mu\text{m}$, tandis que l'actuelle convention alvéolaire présente un diamètre de coupure de $4,0 \mu\text{m}$.



Figure 10 : Photographies illustratives d'un cyclone 10 mm Dorr-Oliver. Plusieurs dispositifs porte-cyclone peuvent être rencontrés.

L'efficacité d'échantillonnage du cyclone Dorr-Oliver en fonction du diamètre aérodynamique des particules a été étudiée dans plusieurs laboratoires [14-18]. Les résultats expérimentaux de l'INRS [19] sont reportés sur les Figures 11 et 12.

Ces résultats sont reportés pour deux valeurs du débit. Pour le débit nominal du cyclone de $1,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ la valeur de D_{50} est $3,65 \mu\text{m}$, ce qui correspond bien à l'ancienne convention ISO-ACGIH. Pour mieux satisfaire les conventions actuelles EN 481 [1] et ISO 7708 [2], le débit a été optimisé à $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, ce qui correspond à une valeur de D_{50} égale à $4,16 \mu\text{m}$. Avec une courbe d'efficacité d'échantillonnage présentant une pente légèrement plus élevée que celle de la courbe conventionnelle, le diamètre de coupure de $4,16 \mu\text{m}$ assure globalement une meilleure performance d'échantillonnage en termes de biais qu'avec un diamètre de coupure requise de $4,0 \mu\text{m}$. Les cartes de biais d'échantillonnage par rapport à la convention sont présentées sur la Figure 12 pour les deux débits.

La valeur du biais est exprimée par un code de couleur pour la distribution granulométrique de l'aérosol dont les paramètres MMAD (Mass Median Aerodynamic Diameter - Diamètre aérodynamique médian en masse) et GSD (Geometric Standard Deviation - Ecart-type géométrique) figurent sur les coordonnées de la carte. Le biais représente l'écart relatif entre la concentration qui serait mesurée par le dispositif de prélèvement placé dans un aérosol de distribution granulométrique connue et la concentration qui correspondrait exactement à la convention alvéolaire pour le même aérosol. La carte de biais permet d'apprécier entre autres choses l'opportunité d'utiliser le dispositif dans une situation donnée [20, 21].

A partir des cartes de la Figure 11 on peut par exemple constater qu'avec le cyclone Dorr-Oliver on obtient des résultats plus proches de la concentration alvéolaire dans le cas des aérosols fins et polydispersés (en haut à gauche de la carte) que dans le cas des aérosols relativement grossiers et peu polydispersés (en bas à droite de la carte). L'écart prévisionnel de mesurage pour ces aérosols fins ne dépasse pas $\pm 10 \%$ en concentration alvéolaire. En utilisant un débit de $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, la carte de biais indique logiquement une

amélioration des performances du cyclone, notamment vis à vis des aérosols plus grossiers.

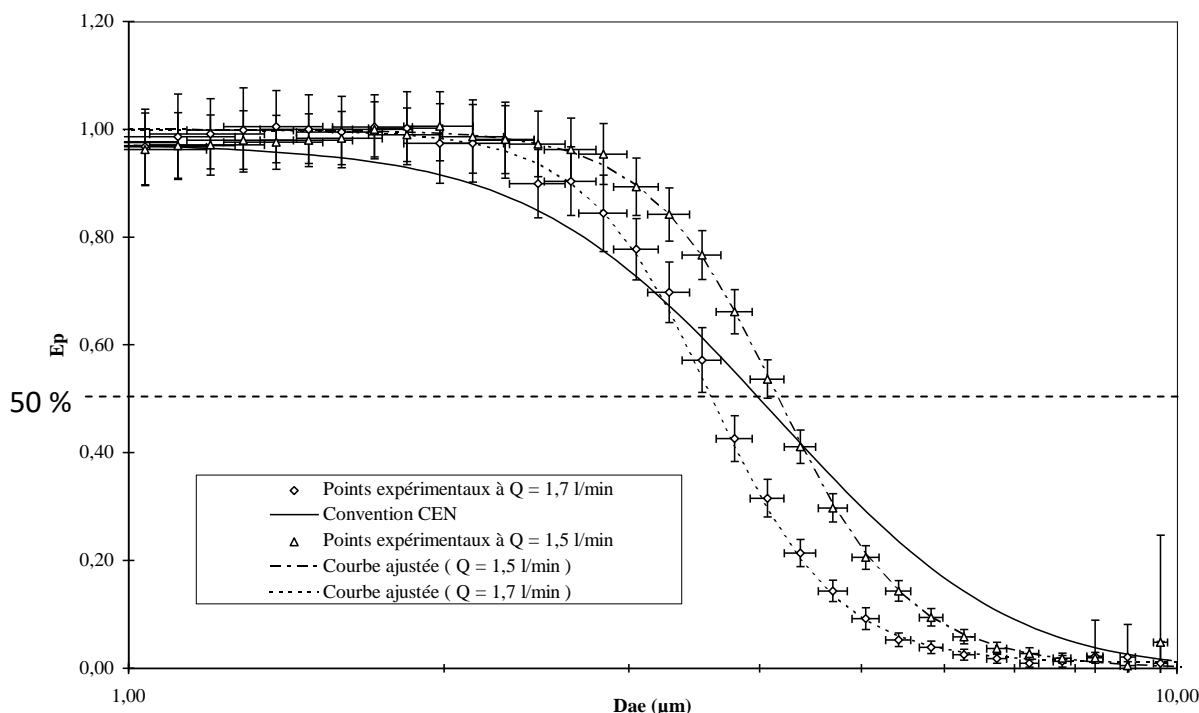


Figure 11 : Valeurs expérimentales d'efficacité d'échantillonnage du cyclone 10 mm Dorr-Oliver en fonction du diamètre aérodynamique des particules. Mesures INRS.

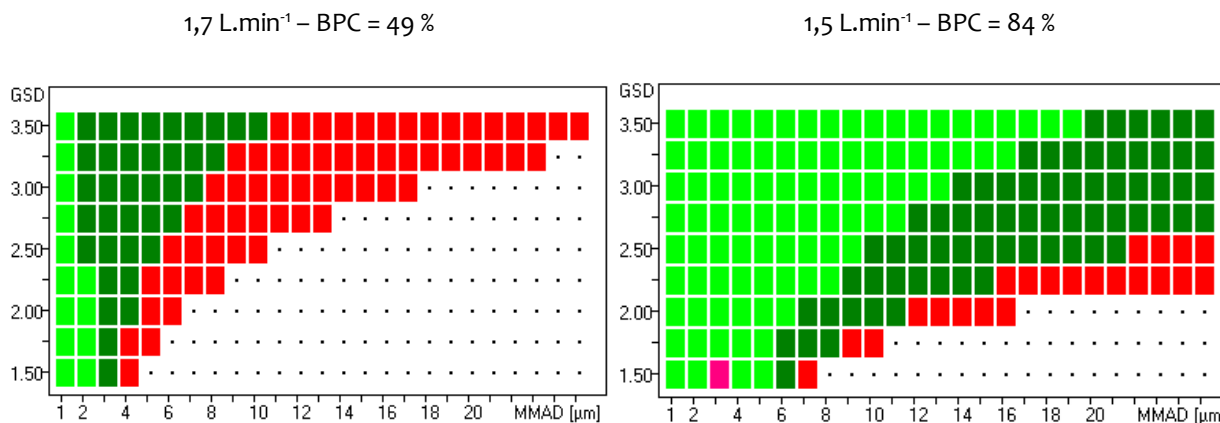


Figure 12 : Cartes de biais du cyclone 10 mm Dorr-Oliver par rapport à la convention alvéolaire EN 481 - ISO 7708, pour les deux débits : 1,7 et 1,5 L.min⁻¹ (BPC – Bias Performance Criterion). Mesures INRS.

Légende des classes du biais :

- -10 % à 0 %
- -20 % à -10 %
- 0 % à +10 %
- +10 % à +20 %

La norme européenne EN 13205 [20] 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'autres termes, 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 des indices de performance BPC. On peut s'apercevoir que cet indice est nettement supérieur dans le cas des mesurages de concentration avec le débit optimisé de $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (BPC = 84%) par rapport aux mesurages avec le débit nominal de $1,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (BPC = 49%).

En général, le cyclone 10 mm Dorr-Oliver présente des performances satisfaisantes pour mesurer la fraction conventionnelle alvéolaire d'un aérosol. Une sous-estimation de la concentration alvéolaire est possible dans le cas d'aérosols plus grossiers ($MMAD > 4 \mu\text{m}$). Cette sous-estimation serait moins sévère en utilisant le débit optimisé de $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (Figure 11). Cependant le débit de $1,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ est la valeur nominale actuellement maintenue pour des raisons d'harmonisation internationale et pour garder la possibilité de se référer à des résultats précédemment mesurés (antériorité des mesures). Les performances du cyclone pour la valeur optimisée du débit, soit $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, ont toutefois été reportées dans ce document pour montrer qu'il est possible d'adapter la méthode du cyclone 10 mm à la convention actuelle CEN-ISO [1, 2].

CYCLONE GS-1

Le cyclone GS-1 (Figure 3b) est conçu pour assurer la sélection de la fraction alvéolaire d'un aérosol.

Le dispositif complet comprend les éléments suivants :

- Cyclone GS-1 (Figure 3b) fabriqué dans un matériau plastique conducteur pour dissiper les charges électrostatiques et présentant un orifice de captage proche de celui d'un cyclone Dorr-Oliver.
- Cassette porte-filtre ouverte (Figure 3b) pour filtres de $\varnothing 37$ ou 25 mm , en fonction de la pièce d'adaptation utilisée en sortie du cyclone. Présence d'un joint torique qui permet d'assembler la cassette ouverte de manière étanche.
- Dispositif porte-cyclone pour réaliser un prélèvement individuel.
- Filtre de prélèvement (suivant l'analyse envisagée).
- Pompe de prélèvement à un débit stabilisé de $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} \pm 5 \%$.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

L'INRS n'a pas produit de données sur les performances physiques d'échantillonnage du cyclone GS1. Les seuls résultats disponibles à ce jour [22] suggèrent qu'à un débit de $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, le GS1 présente des performances satisfaisantes pour mesurer la fraction conventionnelle alvéolaire d'un aérosol et globalement équivalentes aux autres cyclones présentés dans le Tableau 1.

CYCLONE HIGGINS-DEWELL

Le cyclone Higgins-Dewell (Figure 3a) est conçu pour assurer la sélection de la fraction alvéolaire d'un aérosol.

Le dispositif complet comprend les éléments suivants :

- Cyclone Higgins-Dewell (Figure 3a) fabriqué dans un matériau plastique conducteur pour dissiper les charges électrostatiques.
- Cassette porte-filtre dédiée (Figure 3a) pour filtres de $\varnothing 37$ ou 25 mm .
- Dispositif prêt à l'emploi pour réaliser un prélèvement individuel.
- Filtre de prélèvement (suivant l'analyse envisagée).

- Pompe de prélèvement à un débit stabilisé de $2,2 \text{ L.min}^{-1} \pm 5 \%$.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

L'INRS n'a pas produit de données sur les performances physiques d'échantillonnage du cyclone Higgins-Dewell. Pour autant, les résultats disponibles montrent que le cyclone Higgins-Dewell sélectionne les particules suivant une courbe d'efficacité d'échantillonnage qui présente des pentes légèrement plus élevées que la fraction alvéolaire et un diamètre de coupure proche de $4 \mu\text{m}$ [22-25]. Ses performances à un débit de $2,2 \text{ L.min}^{-1}$ sont jugées satisfaisantes pour mesurer la fraction conventionnelle alvéolaire d'un aérosol et globalement équivalentes aux autres cyclones présentés dans le Tableau 1.

DUST CYCLONE

Le Dust cyclone (Figure 3c) est conçu pour assurer la sélection de la fraction alvéolaire d'un aérosol.

Le dispositif complet comprend les éléments suivants :

- Dust cyclone (Figure 3c) fabriqué en aluminium.
- Cassette porte-filtre ouverte (Figure 3c) pour filtres de $\varnothing 37$ ou 25 mm , en fonction du modèle de cyclone. Présence d'un joint torique qui permet d'assembler la cassette ouverte de manière étanche.
- Dispositif porte-cyclone pour réaliser un prélèvement individuel.
- Filtre de prélèvement (suivant l'analyse envisagée).
- Pompe de prélèvement à un débit stabilisé de $2,5 \text{ L.min}^{-1} \pm 5 \%$. Existence d'une pièce d'adaptation (Figure 8) pour faciliter la mesure du débit.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

L'INRS n'a pas produit de données sur les performances physiques d'échantillonnage du Dust cyclone à un débit de $2,5 \text{ L.min}^{-1}$. Les résultats disponibles montrent que ce cyclone sélectionne les particules suivant une courbe d'efficacité d'échantillonnage qui présente des pentes légèrement plus élevées que la fraction alvéolaire et un diamètre de coupure proche de $4 \mu\text{m}$ [22, 26]. Même si peu de données sont disponibles, ses performances à un débit de $2,5 \text{ L.min}^{-1}$ apparaissent comme satisfaisantes et équivalentes aux autres cyclones présentés dans le Tableau 1 pour mesurer la fraction conventionnelle alvéolaire d'un aérosol.

CYCLONE GS-3

Le cyclone GS-3 est conçu pour assurer la sélection de la fraction alvéolaire d'un aérosol.

Le dispositif complet comprend les éléments suivants :

- Cyclone GS-3 fabriqué dans un matériau plastique conducteur pour dissiper les charges électrostatiques et présentant trois orifices de captage de dimensions proches de celui d'un cyclone Dorr-Oliver pour minimiser les effets dus à l'orientation du dispositif face à une source de particules ou à la vitesse d'air au voisinage du cyclone.
- Cassette porte-filtre ouverte pour filtres de $\varnothing 37$ ou 25 mm , en fonction de la pièce d'adaptation utilisée en sortie du cyclone. Présence d'un joint torique qui permet d'assembler la cassette ouverte de manière étanche.
- Dispositif porte-cyclone pour réaliser un prélèvement individuel.

- Filtre de prélèvement (suivant l'analyse envisagée).
- Pompe de prélèvement à un débit stabilisé de $2,75 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} \pm 5 \%$.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

L'INRS n'a pas produit de données sur les performances physiques d'échantillonnage du cyclone GS3. Les seuls résultats disponibles à ce jour [22] suggèrent qu'à un débit de $2,75 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, le GS3 présente des performances satisfaisantes pour mesurer la fraction conventionnelle alvéolaire d'un aérosol et globalement équivalentes aux autres cyclones présentés dans le Tableau 1.

CYCLONE GK2.69

Le cyclone GK2.69 (Figures 3d et 13a) est conçu pour assurer la sélection de la fraction alvéolaire d'un aérosol. Une modification de son débit permet également de cibler la fraction thoracique.

Le dispositif complet comprend les éléments suivants :

- Cyclone GK2.69 (Figures 3d et 13a) fabriqué en aluminium ou en acier inoxydable.
- Cassette porte-filtre ouverte pour filtres de $\varnothing 37$ ou 25 mm , en fonction de la pièce d'adaptation utilisée en sortie du cyclone. Présence d'un joint torique qui permet d'assembler la cassette ouverte de manière étanche.
- Présence d'une pince pour accrocher le cyclone sur le vêtement du travailleur afin de réaliser un prélèvement individuel.
- Filtre de prélèvement (suivant l'analyse envisagée).
- Pompe de prélèvement à un débit stabilisé de $4,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} \pm 5 \%$ pour la fraction alvéolaire et de $1,6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} \pm 5 \%$ pour la fraction thoracique.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

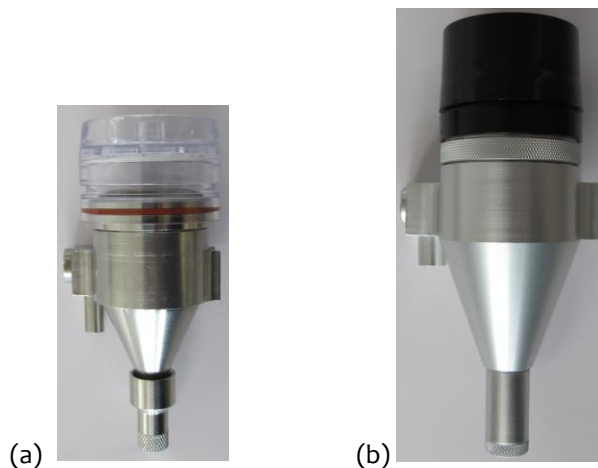


Figure 13 : Photographies d'illustration de cyclones de type Gussman-Kenny [27] :
(a) le cyclone GK2.69 ; (b) le cyclone GK4.162

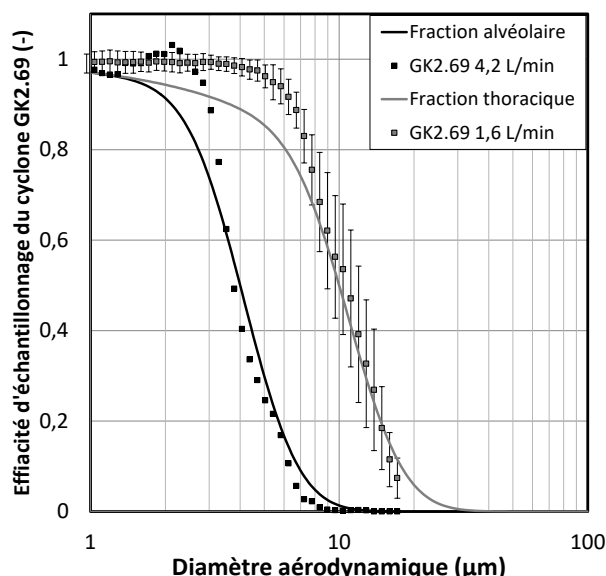
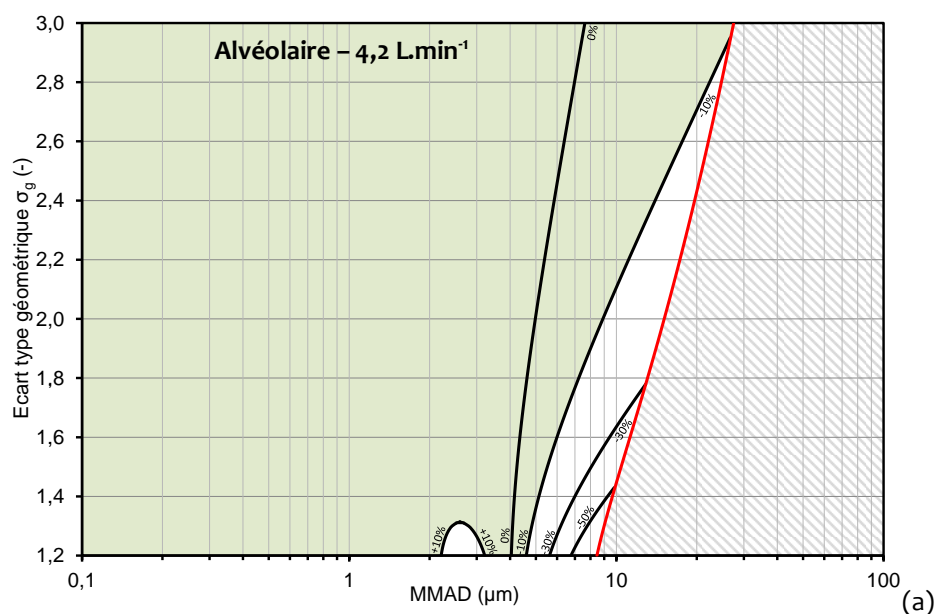


Figure 14 : Efficacités d'échantillonnage du cyclone GK2.69 pour des débits de 4,2 L.min⁻¹ (alvéolaire) et de 1,6 L.min⁻¹ (thoracique). Mesures INRS.

Les efficacités d'échantillonnage du cyclone GK2.69, en fonction du diamètre aérodynamique des particules et pour les deux fractions alvéolaire et thoracique, sont présentées sur la Figure 14. Les barres d'erreurs correspondent à ± 1 écart-type sur la valeur moyenne d'efficacité (≥ 3 essais) et ne sont pas représentées pour toutes les séries pour des raisons de visibilité sur le graphique.

Comme d'autres cyclones, le GK2.69 sélectionne les particules suivant des courbes d'efficacité d'échantillonnage qui présentent des pentes légèrement plus élevées que celles des courbes conventionnelles. Les débits de prélèvement de 4,2 L.min⁻¹ et 1,6 L.min⁻¹ permettent toutefois d'approcher de manière satisfaisante les diamètres de coupures recherchés de 4 et 10 μm et ainsi de sélectionner alternativement les fractions alvéolaire et thoracique.

Les cartes de biais d'échantillonnage par rapport à la convention sont présentées sur la Figure 15 pour les deux débits.



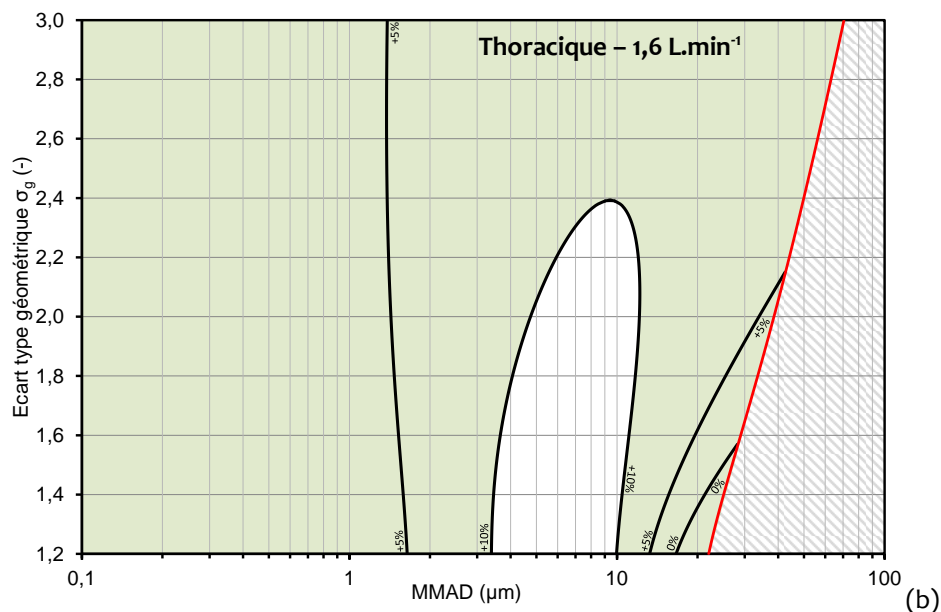


Figure 15 : Cartes de biais du cyclone GK2.69 pour deux débits de fonctionnement 4,2 L.min⁻¹ pour la fraction alvéolaire (a) et 1,6 L.min⁻¹ pour la fraction thoracique (b)

La carte de biais est tracée en fonction des paramètres de la distribution granulométrique d'un aérosol de type log-normal : MMAD (Mass Median Aerodynamic Diameter – Diamètre aérodynamique médian en masse) sur l'axe des X et σ_g (Ecart-type géométrique) sur l'axe des Y. Les points de même valeur de biais ont ensuite été tracés sous forme de lignes sur la carte. La carte de biais représente les écarts relatifs entre la concentration massique qui serait mesurée par le cyclone GK2.69 et la concentration massique qui correspondrait exactement à la fraction conventionnelle visée (alvéolaire ou thoracique) pour le même aérosol [20]. Les zones colorées en vert représentent l'ensemble des paramètres de distribution granulométrique pour lesquels la valeur du biais est de $\pm 10\%$. Les zones grisées correspondent à des distributions granulométriques pour lesquelles le biais n'a pas été calculé, suivant les recommandations de la norme EN 13205 [20].

Le cyclone GK2.69 présente des performances satisfaisantes vis-à-vis des fractions alvéolaire et thoracique, pour des débits de fonctionnement de 4,2 et 1,6 L.min⁻¹, respectivement. Les situations pour lesquelles le biais est compris entre $\pm 10\%$ sont en effet nombreuses et couvrent un grand nombre de distributions granulométriques. A l'inverse, les situations pour lesquelles le biais est supérieur à $\pm 20\%$ sont peu nombreuses et correspondent majoritairement à des aérosols quasi monodispersés ($\sigma < 2$) qui sont peu rencontrés dans les atmosphères professionnelles. Ces résultats et les valeurs de débits proposés sont par ailleurs confirmés par d'autres travaux expérimentaux [23, 24, 28-31].

CYCLONE GK4.162 (RASCAL)

Le cyclone GK4.162 (Figure 13b) est conçu pour assurer la sélection de la fraction alvéolaire d'un aérosol. Une modification de son débit permet également de cibler la fraction thoracique.

Le dispositif complet comprend les éléments suivants :

- Cyclone GK4.162 fabriqué en aluminium (Figure 13b).
- Cassette porte-filtre ouverte pour filtres de $\varnothing 47$ mm (Figure 13b). Présence d'un joint torique qui permet d'assembler la cassette ouverte de manière étanche en sortie du cyclone.

- Présence d'une pince pour accrocher le cyclone sur le vêtement du travailleur afin de réaliser un prélèvement individuel.
- Filtre de prélèvement (suivant l'analyse envisagée).
- Pompe de prélèvement à un débit stabilisé de $8,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} \pm 5 \%$ pour la fraction alvéolaire et de $3,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} \pm 5 \%$ pour la fraction thoracique.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

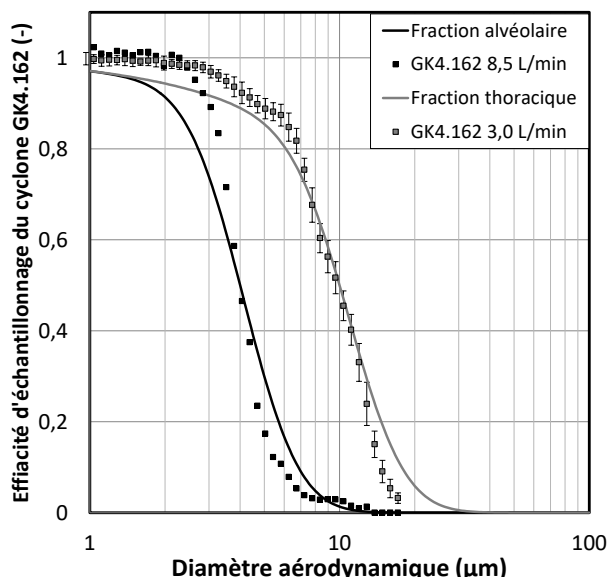


Figure 16 : Efficacités d'échantillonnage du cyclone GK4.162 pour des débits de $8,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (alvéolaire) et de $3,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (thoracique). Mesures INRS.

Les efficacités d'échantillonnage du cyclone GK4.162, en fonction du diamètre aérodynamique des particules et pour les deux fractions thoracique et alvéolaire, sont présentées sur la Figure 16. Les barres d'erreurs correspondent à ± 1 écart-type sur la valeur moyenne d'efficacité (≥ 3 essais) et ne sont pas représentées pour toutes les séries pour des raisons de visibilité sur le graphique.

Le GK4.162 sélectionne les particules suivant des courbes d'efficacité d'échantillonnage qui présentent des pentes légèrement plus élevées que celles des courbes conventionnelles. Les débits de prélèvement d'environ $8,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ et $3,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ permettent toutefois d'approcher de manière satisfaisante les diamètres de coupures recherchés de 4 et 10 μm et de sélectionner alternativement les fractions alvéolaire et thoracique.

Les cartes de biais d'échantillonnage par rapport à la convention sont présentées sur la Figure 17 pour les deux débits.

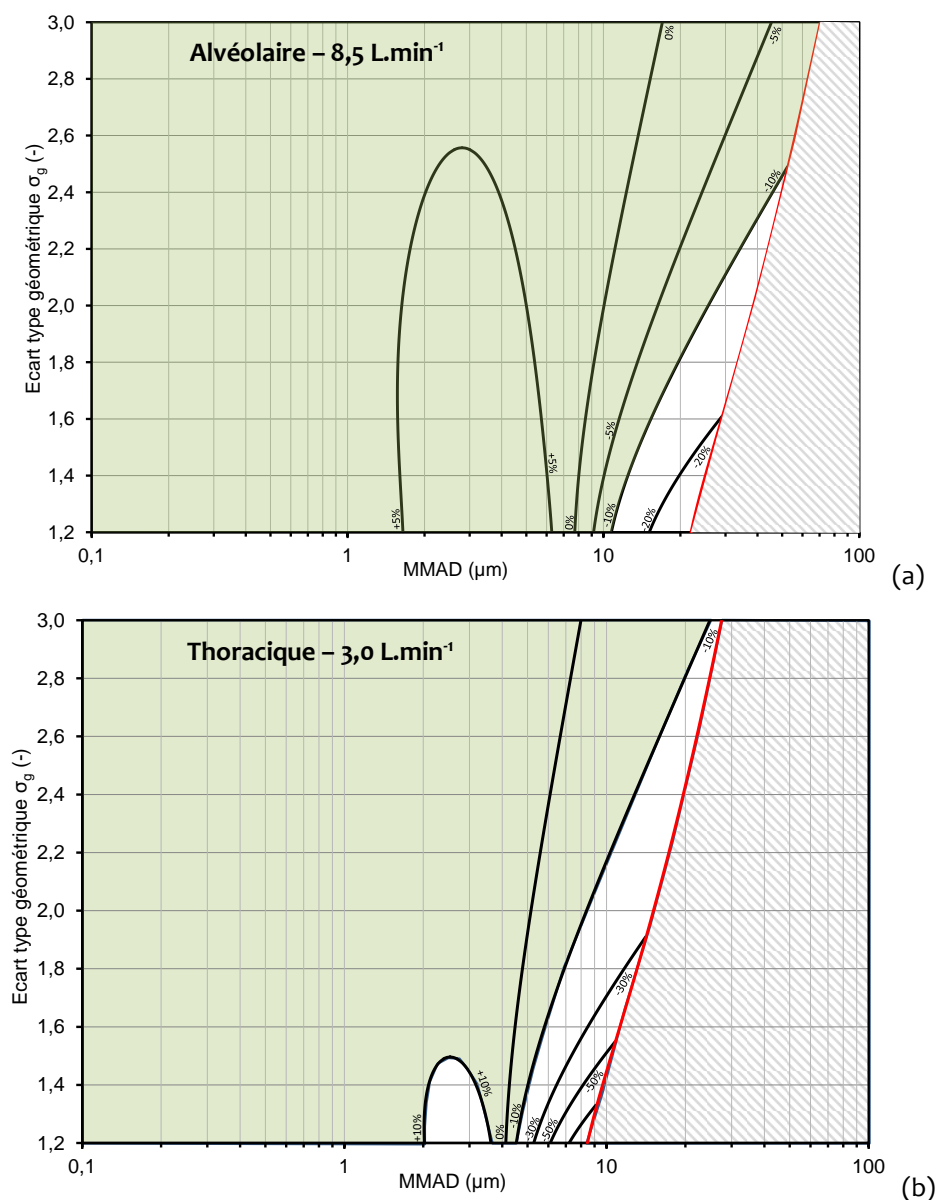


Figure 17 : Cartes de biais du cyclone GK4.162 pour deux débits de fonctionnement 8,5 L.min⁻¹ pour la fraction alvéolaire (a) et 3,0 L.min⁻¹ pour la fraction thoracique (b)

La carte de biais est tracée en fonction des paramètres de distributions granulométriques d'un aérosol de type log-normal : MMAD (Mass Median Aerodynamic Diameter – Diamètre aérodynamique médian en masse) sur l'axe des X et σ_g (Ecart-type géométrique) sur l'axe des Y. Les points de même valeur de biais ont ensuite été tracés sous forme de lignes sur la carte. La carte de biais représente les écarts relatifs entre la concentration massique qui serait mesurée par le cyclone GK4.162 et la concentration massique qui correspondrait exactement à la fraction conventionnelle visée (alvéolaire ou thoracique) pour le même aérosol [20]. Les zones colorées en vert représentent l'ensemble des paramètres de distribution granulométrique pour lesquels la valeur du biais est de $\pm 10\%$. Les zones grisées correspondent à des distributions granulométriques pour lesquelles le biais n'a pas été calculé, suivant les recommandations de la norme EN 13205 [20].

Le cyclone GK4.162 présente des performances satisfaisantes vis-à-vis des fractions alvéolaire et thoracique, pour des débits de fonctionnement de 8,5 et 3,0 L.min⁻¹, respectivement. Les situations pour lesquelles le

bais est compris entre $\pm 10\%$ sont en effet nombreuses et couvrent un grand nombre de distributions granulométriques. Ces résultats et les valeurs de débits proposés sont par ailleurs confirmés par d'autres travaux expérimentaux [23, 28, 32, 33].

COMPARAISON DES CYCLONES DANS LES ATMOSPHERES PROFESSIONNELLES

Si des travaux expérimentaux de laboratoire ont été menés sur chacun des cyclones présentés dans le Tableau 1 pour établir leurs efficacités physiques d'échantillonnage, peu d'études de terrain ont été menées en vue de comparer les concentrations massiques mesurées dans des atmosphères professionnelles.

Quelques études, de laboratoire ou de terrain, ont comparé les concentrations massiques en fraction alvéolaire mesurées par les cyclones Dorr-Oliver, Dust cyclone, SIMPED et/ou GK2.69 [34-36]. Ces travaux ont montré que les différences dans les concentrations mesurées par chacun des cyclones étudiés étaient faibles. Pour généraliser ce discours plutôt rassurant, il serait toutefois souhaitable de disposer de plus nombreuses données, idéalement obtenues dans des situations très variées en termes de polluants, de niveaux de concentrations et de distributions granulométriques rencontrées. Les éventuels dépôts de particules sur les parois internes des cassettes porte-filtre (problématique évoquée en page 10), la sensibilité de chacun des cyclones vis-à-vis de la vitesse d'air environnante ou vis-à-vis de l'orientation du dispositif par rapport à la source de particules seraient ainsi judicieusement pris en compte dans la comparaison des concentrations.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF EN 481 (X 43-276). 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, 1993, 11 p.
- [2] 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, 1996, 14 p.
- [3] LUNDGREN D.A., HARRIS F.S.Jr., MARLOW W.H., LIPPMANN M., CLARC W.E., DURHAM M.D. – Aerosol Measurement. University of Florida Book. Gainesville, University Press of Florida, 1979, pp. 56-89.
- [4] Préparation du matériel en vue d'une intervention en entreprise. INRS, fiche MétroPol, 2015 (<http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-intervention-preparation.pdf>).
- [5] Prélèvement des aérosols par cassette fermée. INRS, fiche MétroPol, 2015 (<http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cassette.pdf>).
- [6] NF EN 1540 (X 43-287). Février 2012. Atmosphères des lieux de travail – Terminologie. La Plaine Saint-Denis, AFNOR, 2012, 57 p.
- [7] NF EN ISO 13137 (X 43-282). Décembre 2013. Air des lieux de travail – Pompes pour l'échantillonnage individuel des agents chimiques et biologiques - Exigences et méthodes d'essai. La Plaine Saint-Denis, AFNOR, 2013, 33 p.
- [8] Principe général et mise en œuvre pratique du prélèvement. INRS, fiche MétroPol, 2015 (<http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-principe.pdf>).
- [9] BLACKFORD D.B., HARRIS G.W., REVELL G. – The reduction of dust losses within the cassette of the SIMPEDS personal dust sampler. *Annals of Occupational Hygiene*, 1985, 29, pp. 169-180.
- [10] SOO J.-C., LEE T., KASHON M., KUSTI M., HARPER M. – Quartz in coal dust deposited on internal surface of respirable size selective samplers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2014, 11, pp. D215-D219
- [11] NF X 43-259. Mai 1990. Qualité de l'air - Air des lieux de travail - Prélèvement individuel ou à poste fixe de

- la fraction alvéolaire de la pollution particulaire. Méthode de séparation par cyclone 10 mm. La Plaine Saint-Denis, AFNOR, 1990, 15 p (en révision en 2019).
- [12] ISO TR 7708 - Air quality - Particle size fractions definitions for the health-related sampling. Geneva. International Organization for Standardization, 1983, 13 p.
- [13] Particle size-selective sampling in the workplace. Report of the ACGIH Technical Committee on Air Sampling Procedures. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1985, 80 p.
- [14] BARON P.A. - Sampler evaluation with an aerodynamic particle sizer. In : Aerosols in the mining and industrial environments. V.A. Marple, B.Y.H. Liu, eds. vol. 3, Ann Arbor. Ann Arbor Science, 1983.
- [15] BARTLEY D.L., CHEN C.C., SONG R., FISCHBACH T.J. – Respirable aerosol sampler performance testing. American Industrial Hygiene Association Journal, 1994, 55, pp. 1036-1064.
- [16] LIDÉN G., KENNY L.C. – Optimization of the performance of existing respirable dust samplers. Applied Occupational and Environmental Hygiene, 1993, 8, pp. 386-391.
- [17] GÖRNER P., FABRIÈS J.F. - Industrial aerosol measurement according to the new sampling conventions. Occupational Hygiene, 1996, 3, pp. 361-376.
- [18] CHEN C.C., LAI T.S., SHIH T.S., HWANG J.S. – Laboratory performance comparison of respirable samplers. American Industrial Hygiene Association Journal, 1999, 60, pp. 601-611.
- [19] GÖRNER P., WROBEL R., MICKA V., SKODA V., DENIS J., FABRIÈS J.F. – Study of fifteen respirable aerosol samplers used in occupational hygiene. Annals of Occupational Hygiene, 2001, 45, pp. 43-54.
- [20] NF EN 13205. (X 43-283) Août 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, 2014, Partie 1 à Partie 6.
- [21] Prélèvement des aérosols - Généralités. INRS, fiche MétroPol, 2015 (<http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-generalite-aerosol.pdf>).
- [22] TRAKUMAS S., HALL P. - Performance assessment of personal respirable cyclone samplers. AIHce Conference, Podium Session 127 - Air Sampling Instrument Performance, Presentation 191, 2003 (<https://www.aiha.org/aihce03/handouts.htm>).
- [23] STACEY P., THORPE A., ECHT A. – Performance of high flow rate personal respirable samplers when challenged with mineral aerosols of different particle size distributions. Annals of Occupational Hygiene, 2016, 60, pp. 479-492.
- [24] TRAKUMAS S., SALTER E. – Parallel particle impactor - novel size-selective particle sampler for accurate fractioning of inhalable particles. Journal of Physics: Conference Series (Inhaled Particles X, 23-25 september 2008, Manchester), 2009, 151, 16 p.
- [25] LIDÉN G., KENNY L.C. – Comparison of measured respirable dust sampler penetration curves with sampling conventions. Annals of Occupational Hygiene, 1991, 35, pp. 485-504.
- [26] HARPER M., FANG C.P., BARTLEY D.L., COHEN B.S. – Calibration of the SKC aluminum cyclone for operation in accordance with ISO/CEN/ACGIH respirable aerosol sampling criteria. Journal of Aerosol Science, 1998, 29, pp. S347-S348.
- [27] KENNY L.C., GUSSMAN R.A. – Characterization and modeling of a family of cyclone aerosol pre-separators. Journal of Aerosol Science, 1997, 28, pp. 677-688.
- [28] GÖRNER P., SIMON X., BOIVIN A., BAU S. – Sampling efficiency and performance of selected thoracic aerosol samplers. Annals of Work Exposures and Health, 2017, 61, pp. 784-796.
- [29] LEE T., KIM S.W., CHISHOLM W.P., SLAVEN J.E., HARPER M. – Performance of high flow rate samplers for respirable particle collection. Annals of Occupational Hygiene, 2010, 54, pp. 697-709.
- [30] Maynard A. – Measurement of aerosol penetration through six personal thoracic samplers under calm air conditions. Journal of Aerosol Science, 1999, 30, pp. 1227-1242.

- [31] JONES A.D., AITKEN R.J., FABRIES J.F., KAUFFER E., LIDEN G., et al. – Thoracic size-selective sampling of fibres: Performance of four types of thoracic sampler in laboratory tests. *Annals of Occupational Hygiene*, 2005, 49, pp. 481-492.
- [32] THORPE A. – Evaluation of the penetration characteristics of a high flow rate personal cyclone sampler for NIOSH - HSL report ECM/2011/03, 2011, 13 p.
- [33] LEE T., THORPE A., CAUDA E., TIPTON L., SANDERSON W.T., et al. – Laboratory comparison of new high flow rate respirable size-selective sampler. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2018.
- [34] LEE T., HARPER M., KASHON M., LEE L.A., HEALY C.B., et al. – Silica measurement with high flow rate respirable size selective samplers: A field study. *Annals of Occupational Hygiene*, 2016, 60, pp. 334-347.
- [35] LEE T., LEE E.G., KIM S.W., CHISHOLM W.P., KASHON M., et al. - Quartz measurement in coal dust with high-flow rate samplers: Laboratory study. *Annals of occupational hygiene*, 2012, 56, pp. 413-425.
- [36] STACEY P., LEE T., THORPE A., ROBERTS P., FROST G., et al. – Collection efficiencies of high flow rate personal respirable samplers when measuring arizona road dust and analysis of quartz by X-ray diffraction. *Annals of Occupational Hygiene*, 2014, 58, pp. 512-523.

AUTEUR

P.Görner, X.Simon, O.Witschger

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

HISTORIQUE

Version	Date	Modifications
1	Octobre 2015	Création de la fiche
2	Décembre 2018	Refonte complète de la fiche. Présentation de plus nombreux cyclones. Mise en conformité des informations avec la norme NF X 43-259 en cours de révision (2019).