

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 particulaires 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	3
Exemples de cyclones	4
Montage et utilisation d'un cyclone	6
Mesure du débit d'un cyclone	7
Montage avec une boîte étanche de calibration	8
Montage par connexion directe sur l'entrée du cyclone	9
Autres montages pour la mesure du débit des cyclones Dorr-Oliver et Dust cyclone.....	9
Calcul de la concentration en particules dans l'air	10
Performances des cyclones	11
Cyclone Dorr-Oliver.....	13
Cyclone GS-1	16
Cyclone Higgins-Dewell	18
Dust cyclone.....	19

Cyclone GS-3.....	21
Cyclone GK2.69	22
Cyclone GK4.162 (Rascal)	25
Cyclone FSP-10	28
Comparaison des cyclones dans les atmosphères professionnelles	30
Bibliographie.....	30
Historique et auteurs.....	33
Contact	33

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN CYCLONE

Un cyclone est un dispositif de séparation des particules d'un aérosol en fonction de leur diamètre aérodynamique¹ 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.

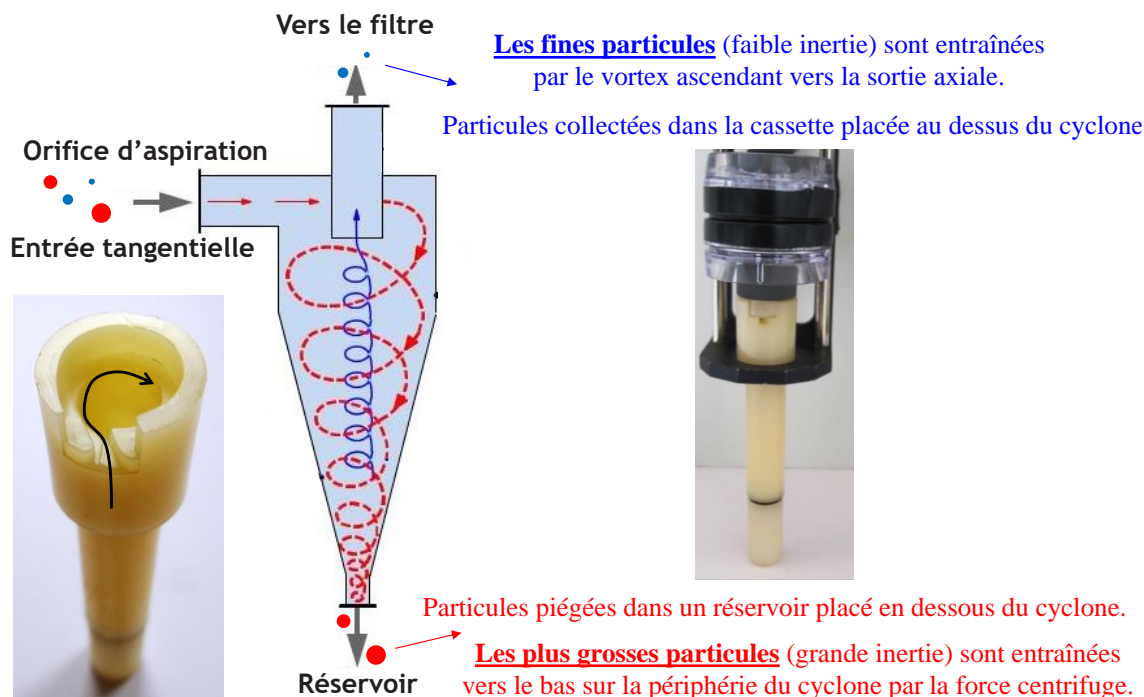


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'un cyclone. Photos d'illustration avec un cyclone Dorrr-Oliver

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 (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'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 d'échantillonnage 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 μm .

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.

¹ Voir la définition du diamètre aérodynamique dans la fiche MétroPol [13]

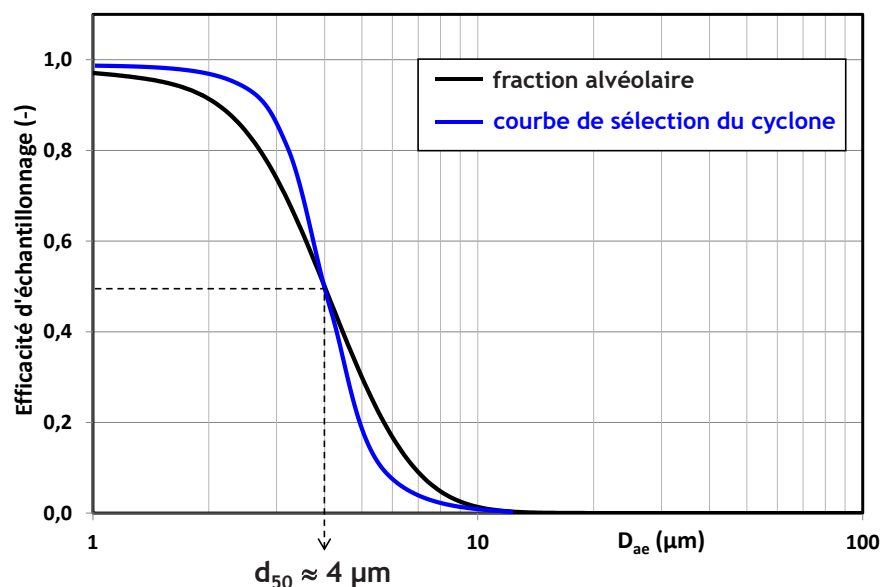


Figure 2 : Exemple de courbe de sélection d'un cyclone (d_{50} = diamètre de coupure)

EXEMPLES DE CYCLONES

De nombreux cyclones sont disponibles commercialement pour réaliser le prélèvement des aérosols. Le Tableau 1 présente, de manière peut-être non exhaustive, des 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 clefs : cyclone + 'modèle de cyclone' + aérosols.

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		1,5	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
FSP-10		Alvéolaire : 10 Thoracique : 3,5	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, parfois en ayant recourt à des pièces d'adaptation, à l'exception du cyclone GK 4.162 (filtres de 47 mm uniquement) et du cyclone FSP-10 (filtres de 37 mm uniquement).

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 les mêmes éléments qu'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 dispose d'un porte-filtre qui lui est spécifiquement dédié (vendu avec le dispositif, réutilisable et disponible en version 25 ou 37 mm – illustré en Figure 3a). De même, le cyclone FSP-10 dispose d'un porte-filtre spécifique (vendu avec le dispositif, réutilisable et disponible uniquement en version 37 mm). 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 (par exemple, GS1, GS3, Dust cyclone ou GK 2.69 sur la Figure 3). Dans tous les cas, il est nécessaire de se reporter à la notice de montage délivrée par le fournisseur.

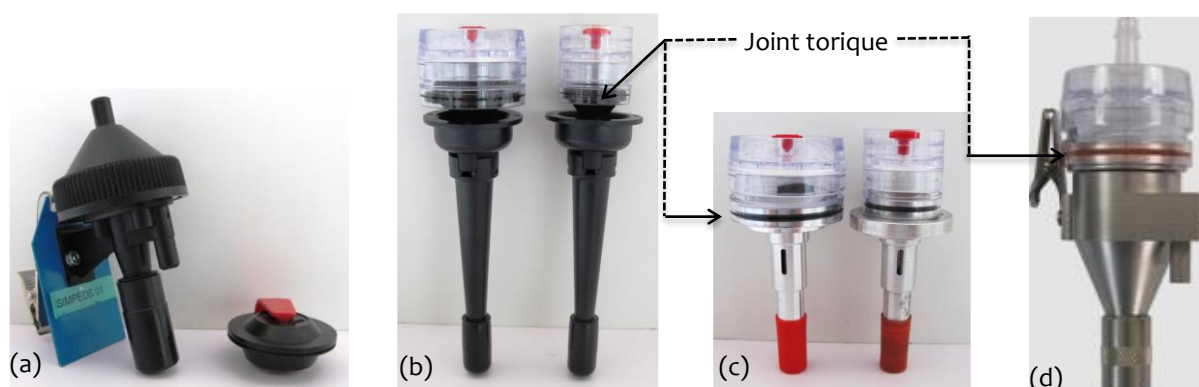


Figure 3 : Photographies d'illustration de plusieurs cyclones : (a) le cyclone Higgins-Dewell et son porte-filtre dédié ; (b) les cyclones GS1 ou GS3 ; (c) le Dust cyclone et (d) le cyclone GK 2.69

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 microfibrilles de verre ou de quartz, etc.) devront être compatibles avec la perte de charge associée au débit de prélèvement et 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 portes-filtres doivent se conformer aux mêmes protocoles et vérifications que ceux explicités pour une cassette fermée 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 du porte-filtre 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.

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 $\pm 5\%$ 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 régulier 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.

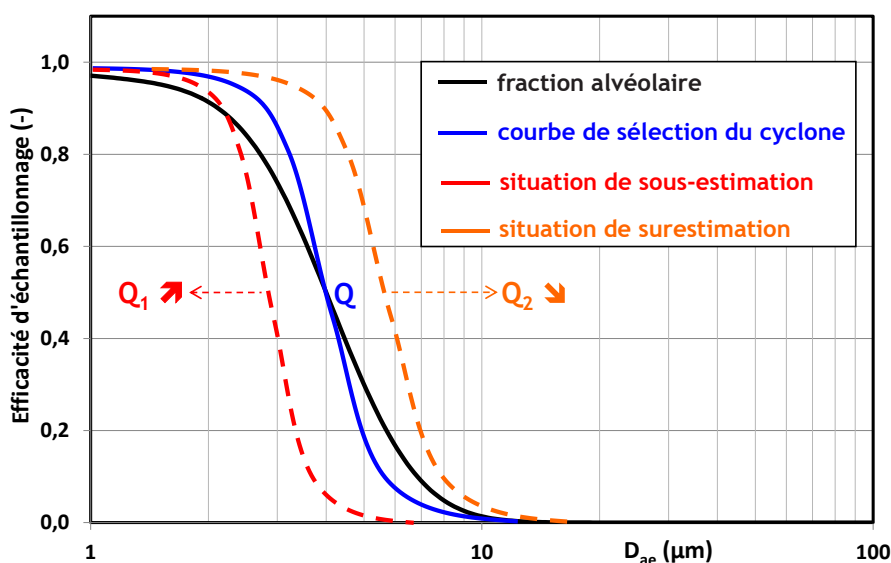


Figure 4 : Influence du débit de prélèvement d'un cyclone sur son efficacité d'échantillonnage

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.

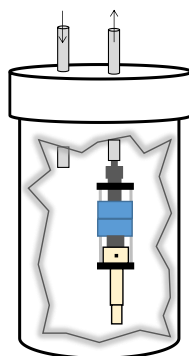
En toute rigueur, l'ensemble du dispositif (cyclone + porte-filtre) doit être inclus dans le montage permettant la mesure du débit de prélèvement. Il est par ailleurs nécessaire d'utiliser un débitmètre présentant une très faible perte de charge. Un débitmètre, étalonné et vérifié, est préconisé (électronique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

MONTAGE AVEC UNE BOITE ETANCHE DE CALIBRATION

Pour certains cyclones comme le Dorr-Oliver, le GS1, le GS3 ou le Dust cyclone, la géométrie des entrées ne permet pas de connecter directement, de manière étanche, un débitmètre. Pour ceux-là particulièrement mais plus généralement pour tous les cyclones, il est possible de mesurer le débit d'un cyclone dans son ensemble en utilisant une boîte étanche, comme proposé sur le montage de la Figure 5.



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.

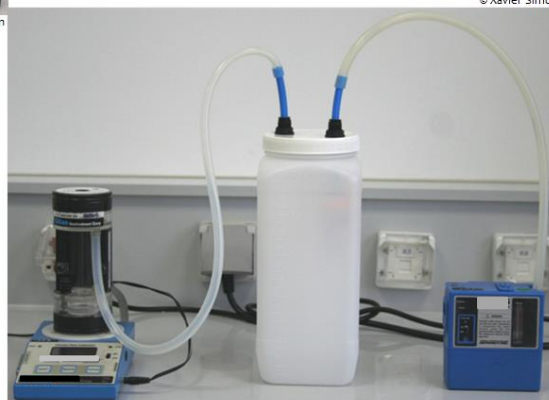


Figure 5 : Exemples de montages avec une boîte étanche de calibration pour la mesure du débit de prélèvement d'un cyclone

MONTAGE PAR CONNEXION DIRECTE SUR L'ENTRÉE 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 6.

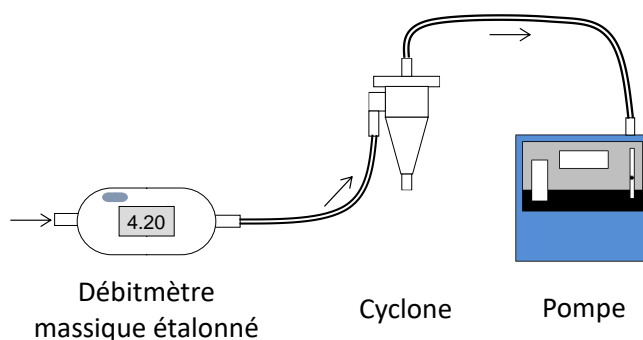


Figure 6 : Montage préconisé pour la mesure du débit de prélèvement des cyclones Higgins-Dewell, GK 2.69 ou GK 4.162 et rendu possible du fait de la géométrie de leurs entrées

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.

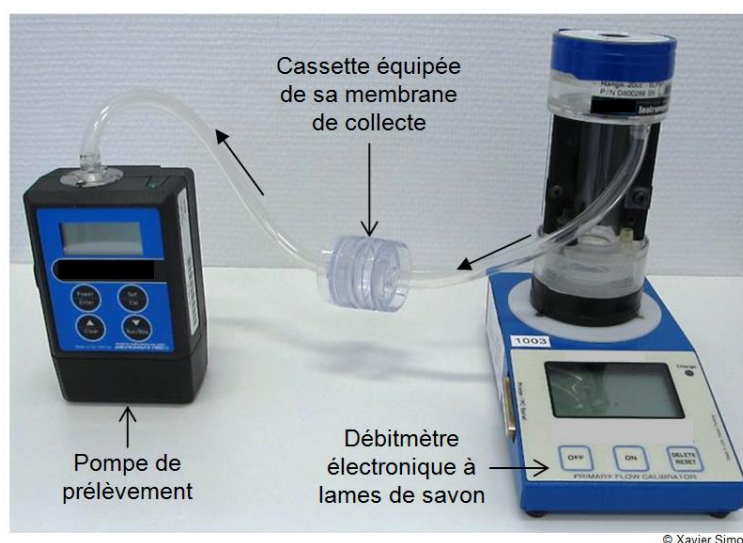


Figure 7 : Montage possible pour la mesure du débit de prélèvement d'une cassette fermée servant d'étage de collecte dans un cyclone Dorr-Oliver

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.

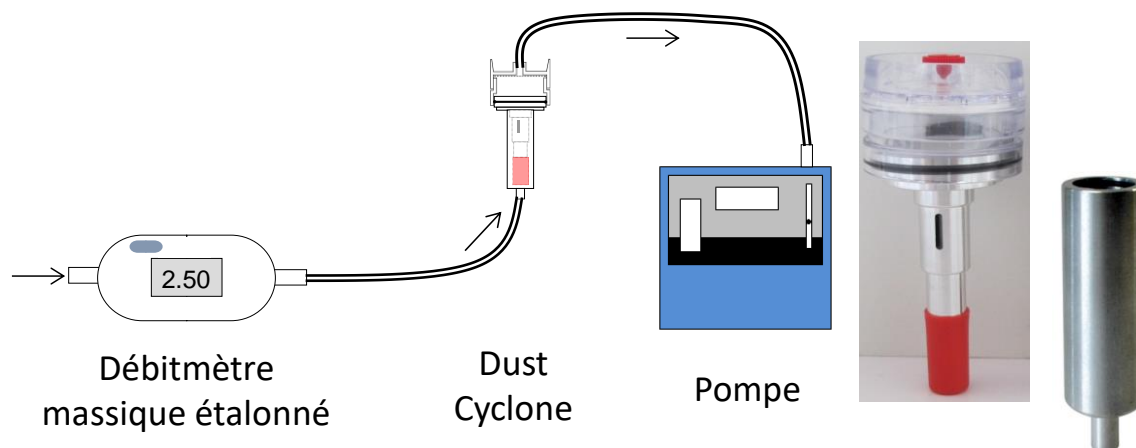


Figure 8 : Montage possible pour la mesure du débit de prélèvement d'un Dust cyclone

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 ±1% dans la mesure des débits suivant les configurations suivantes :

Cyclone Dorr-Oliver 1,5 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/m³) ;

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

V : volume d'air échantillonné pendant le prélèvement (m³) ;

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 fiche du guide méthodologique de MétroPol intitulée « [analyse gravimétrique](#) » [9]. 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 divers (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 le plus souvent concordantes 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 d'efficacité d'échantillonnage de l'ensemble des cyclones. 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 .

Les cyclones et leurs performances vont être décrits individuellement et plus précisément dans la suite de ce document. Les performances sont issues de l'exploitation des jeux de données expérimentales disponibles dans la littérature scientifique concernant l'efficacité de sélection de chaque dispositif de prélèvement en fonction du diamètre aérodynamique. Il s'agit donc de données fiables, issues d'articles scientifiques publiés, de supports de communications orales présentées en congrès scientifiques ou, à défaut, de documents issus de la littérature grise ou de rapports d'essais archivés. Les articles et autres documents utilisés pour recueillir ce (ou ces) jeu(x) de données expérimentales ont été référencés et les données ont été exploitées pour présenter l'efficacité de sélection moyenne de chaque cyclone en fonction du diamètre aérodynamique des particules, ainsi que les cartes de biais associées et d'autres indicateurs pertinents résumés dans le Tableau 2. Les points expérimentaux ont été directement récupérés à partir des graphiques publiés dans les documents en utilisant un programme permettant de toujours extraire de la même manière les données d'une courbe scannée ou disponible sous format image (la fonction Digitizer sous Origin ou le logiciel gratuit PlotDigitizer peuvent ainsi être utilisés à cette fin, par exemple). A partir du nuage de points obtenus avec le (ou les) jeu(x) de données expérimentales employés, une courbe unique d'efficacité de sélection des particules était déterminée en ajustant et en optimisant un modèle mathématique de type $0,5 \times [1 - \tanh(A \times \ln(B \times D_{ae}))]$, où A et B sont les paramètres d'optimisation du modèle.

En utilisant la courbe modèle d'efficacité de sélection des particules et en suivant la méthodologie décrite dans la Section 8.3 de la norme EN 13205-2 [12], les valeurs de biais du dispositif de sélection peuvent être calculées pour un ensemble de distributions de tailles d'aérosols et ont été représentées dans un graphique bidimensionnel dénommé « carte de biais ». La carte de biais représente les écarts relatifs entre la concentration d'un aérosol qui est mesurée par le dispositif de prélèvement étudié (représenté par sa courbe modèle d'efficacité de sélection) et la concentration idéale qui serait obtenue pour le même aérosol en utilisant un dispositif de prélèvement idéal correspondant exactement à la fraction ciblée (alvéolaire ou thoracique, représenté par les modèles mathématiques descriptifs des conventions alvéolaire ou

thoracique). Plus précisément, pour toute distribution de tailles de l'aérosol, les biais sont calculés selon la formule fournie dans la Section 8.3.3 (Calcul du biais du dispositif de prélèvement) de la norme 13205-2 en calculant la concentration de l'aérosol prélevé suivant la méthode de l'« ajustement de courbe » décrite dans la Section 8.3.1.3 de la norme 13205-2. Comme indiqué dans la Section 8.3.3 de la norme 13205-2, la carte de biais compile l'ensemble des valeurs de biais calculés dans un graphique bidimensionnel sur lequel (1) l'axe des ordonnées représente l'écart-type géométrique de l'aérosol prélevé, (2) l'axe des abscisses représente le diamètre aérodynamique massique médian de l'aérosol prélevé (MMAD) et (3) des courbes continues relient les points d'égal biais et un nuancier de couleurs est utilisé pour clairement délimiter des surfaces de valeurs de biais et faciliter la lecture. Ces cartes sont calculées sous l'hypothèse que l'aérosol suit une loi de distribution lognormale monomodale. Les aérosols rencontrés en atmosphères professionnelles sont majoritairement polydispersés et les distributions granulométriques associées présentent des écarts types géométriques supérieurs à 2.

Sélecteur	Débit de prélèvement	Diamètre de coupure	Fraction de biais compris entre $\pm 15\%$
	Q (L/min)	$D_{ae,50}$ (μm)	(%)
Dorr-Oliver	1,5	4,17	100,0
Dorr-Oliver	1,7	3,70	90,3
GS-1	2	3,85	92,9
Higgins-Dewell	2,2	4,35	100,0
Dust Cyclone	2,5	3,70	87,0
GS-3	2,75	4,17	99,8
GK 2.69	4,2	4,00	99,7
GK 4.162	8,5	4,17	99,6
FSP-10	10	4,17	98,7

Tableau 2 : Synthèse des diamètres de coupure et des fractions de biais compris entre $\pm 15\%$ pour différents cyclones de la fraction alvéolaire

La carte de biais permet d'apprécier entre autres choses l'opportunité d'utiliser le dispositif dans une situation donnée [12, 13]. Par ailleurs, une fraction de biais compris entre $\pm 15\%$ qui serait par exemple $\geq 98\%$ permet d'objectiver le fait que moins de 2% des distributions granulométriques susceptibles d'être rencontrées en atmosphères professionnelles conduisent à un biais de prélèvement supérieur à 15 %. Il s'agit généralement d'aérosols microniques, voire grossiers, présentant un MMAD compris entre environ 8 et 30 μm et contenant une proportion minoritaire de particules en fraction alvéolaire au sein de l'aérosol total.

Remarque : Les particules échantillonnées dans un porte-filtre à l'aval d'un cyclone peuvent se déposer sur les parois internes de la cassette [10, 11]. 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.* [11] 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.

CYCLONE DORR-OLIVER

Le cyclone Dorr-Oliver (Figure 9) est conçu pour assurer la sélection de la fraction alvéolaire d'un aérosol. Cette méthode de prélèvement est décrite dans la norme NF X43-259 [14].

Le dispositif complet comprend les éléments suivants :

- Cyclone 10 mm nylon Dorr-Oliver (Figure 9), présentant un orifice de captage carré et de dimensions 2,5 mm × 2,5 mm, débit nominal préconisé de 1,5 L.min⁻¹ (en remplacement de celui de 1,7 L.min⁻¹ indiqué dans la norme NF X43-259 et le plus souvent rencontré jusqu'en 2025).
- Cassette porte-filtre fermée (Figure 9) pour filtres de Ø 37 ou 25 mm.
- Dispositif porte-cyclone pour réaliser un prélèvement individuel (Figure 9).
- Filtre de prélèvement (suivant l'analyse envisagée).
- Pompe de prélèvement à un débit recommandé stabilisé de 1,5 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) [15] et ACGIH (1985) [16]. 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 µm, tandis que l'actuelle convention alvéolaire présente un diamètre de coupure de 4,0 µm.



Figure 9 : Photographies illustratives d'un cyclone 10 mm Dorr-Oliver.
Plusieurs dispositifs porte-cyclone peuvent être rencontrés.

Les seuls résultats expérimentaux de l'INRS [17] sont tout d'abord présentés sur la Figure 10. Ces résultats sont reportés pour deux valeurs du débit. Pour le débit nominal du cyclone de 1,7 L.min⁻¹ la valeur de D₅₀ est 3,65 µm, ce qui correspond bien à l'ancienne convention ISO-ACGIH. Pour mieux satisfaire l'actuelle convention alvéolaire décrite dans les normes EN 481 [1] et ISO 7708 [2], le débit a été optimisé à 1,5 L.min⁻¹, ce qui correspond à une valeur de D₅₀ égale à 4,17 µm. Avec une courbe d'efficacité d'échantillonnage présentant une pente légèrement plus élevée que celle de la courbe conventionnelle, le diamètre de coupure de 4,17 µm assure globalement une meilleure performance d'échantillonnage vis-à-vis de la fraction alvéolaire.

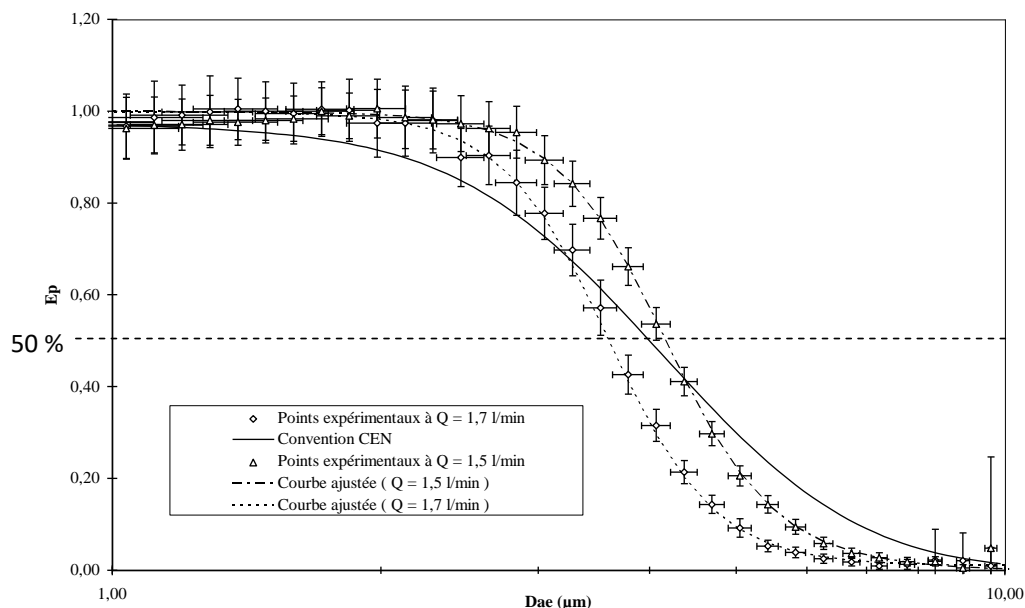


Figure 10 : Valeurs expérimentales d'efficacité d'échantillonnage du cyclone 10 mm Dorr-Oliver en fonction du diamètre aérodynamique des particules. Mesures INRS pour des débits de prélèvement de 1,5 L.min⁻¹ et 1,7 L.min⁻¹ [17].

L'efficacité d'échantillonnage du cyclone Dorr-Oliver à 1,5 L.min⁻¹ en fonction du diamètre aérodynamique des particules est présentée sur la Figure 11 pour un nombre de données plus conséquent, provenant de différents travaux [17-20].

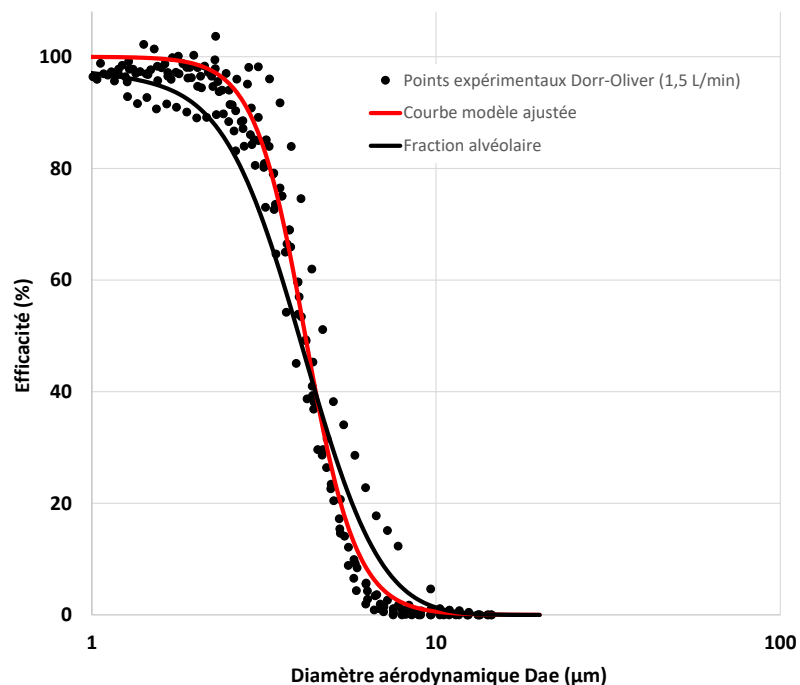


Figure 11 : Représentation graphique de la courbe modèle ajustée sur les points expérimentaux [17-20] d'efficacité de sélection du cyclone Dorr-Oliver à un débit de prélèvement de 1,5 L.min⁻¹. Comparaison avec la courbe conventionnelle de la fraction alvéolaire.

La carte de biais du cyclone Dorr-Oliver à 1,5 L.min⁻¹ est représentée sur la Figure 12.

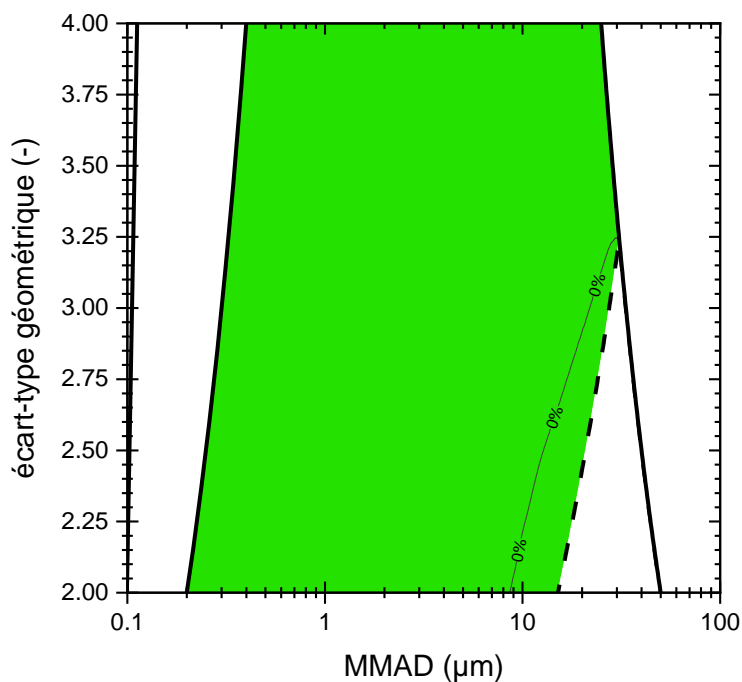


Figure 12 : Carte de biais du cyclone Dorr-Oliver à un débit de prélèvement de 1,5 L.min⁻¹.

A titre informatif, même si ce débit n'est plus considéré comme optimal, l'efficacité d'échantillonnage du cyclone Dorr-Oliver à 1,7 L.min⁻¹ en fonction du diamètre aérodynamique des particules est présentée sur la Figure 13 (compilation des données provenant de différents travaux [17, 19-27] - débit de 1,65 L.min⁻¹ pour Chen et Huang 1999 [24]).

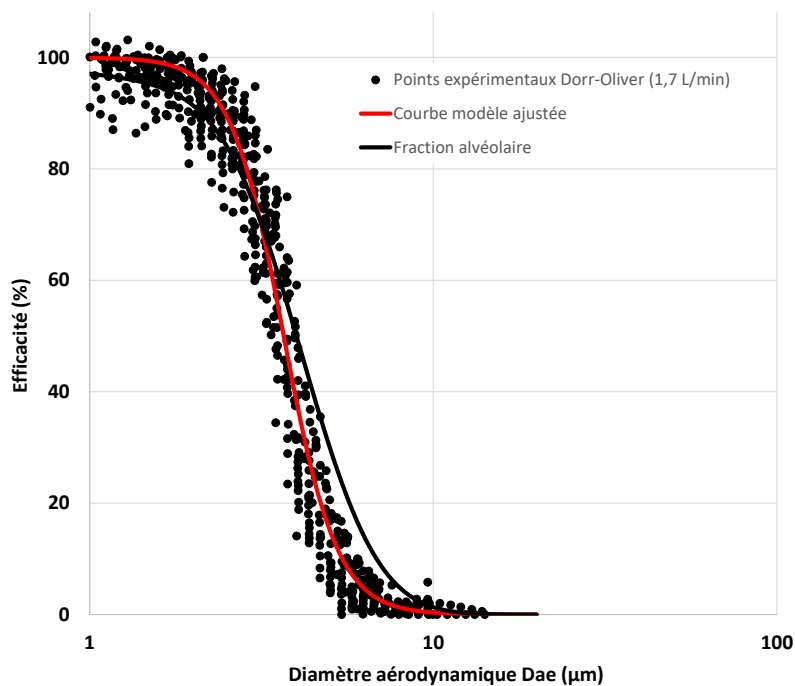


Figure 13 : Représentation graphique de la courbe modèle ajustée sur les points expérimentaux [17, 19-27] d'efficacité de sélection du cyclone Dorr-Oliver à un débit de prélèvement de 1,7 L.min⁻¹. Comparaison avec la courbe conventionnelle de la fraction alvéolaire.

La carte de biais du cyclone Dorr-Oliver à 1,7 L.min⁻¹ est représentée sur la Figure 14.

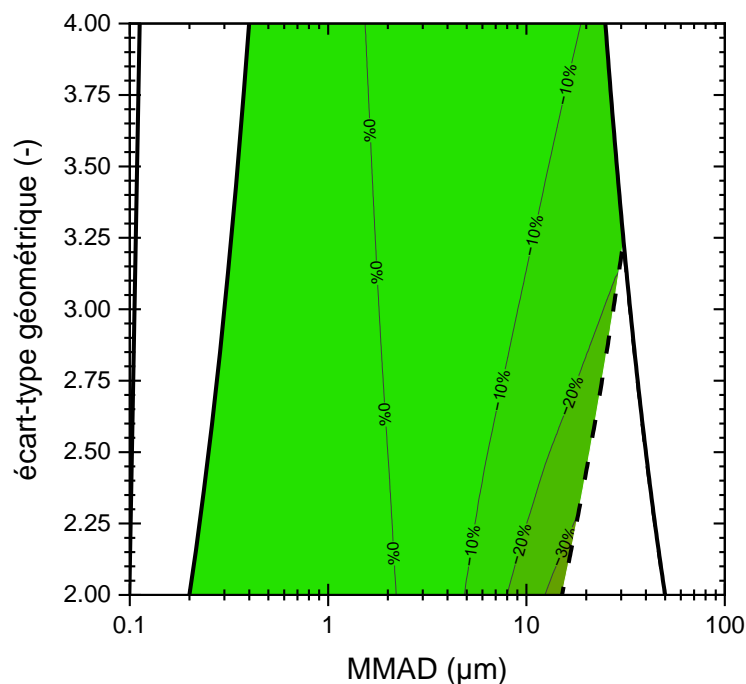


Figure 14 : Carte de biais du cyclone Dorr-Oliver à un débit de prélèvement de 1,7 L.min⁻¹.

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 Ø 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 L.min⁻¹ ± 5 %.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

L'efficacité d'échantillonnage du cyclone GS-1 à $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ en fonction du diamètre aérodynamique des particules est présentée sur la Figure 15 pour les seules données disponibles à notre connaissance [26].

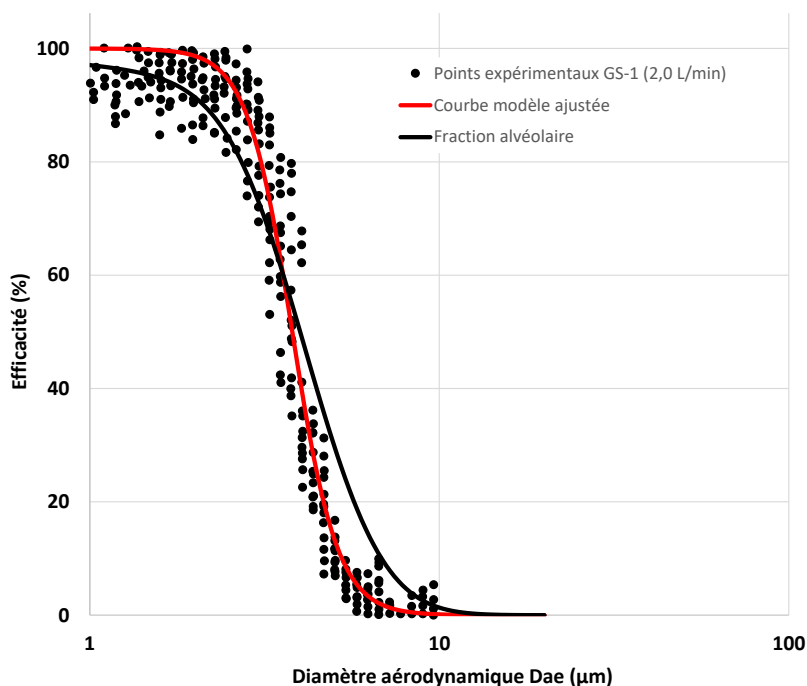


Figure 15 : Représentation graphique de la courbe modèle ajustée sur les points expérimentaux [26] d'efficacité de sélection du cyclone GS-1 à un débit de prélèvement de $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Comparaison avec la courbe conventionnelle de la fraction alvéolaire.

La carte de biais du cyclone GS-1 à $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ est représentée sur la Figure 16.

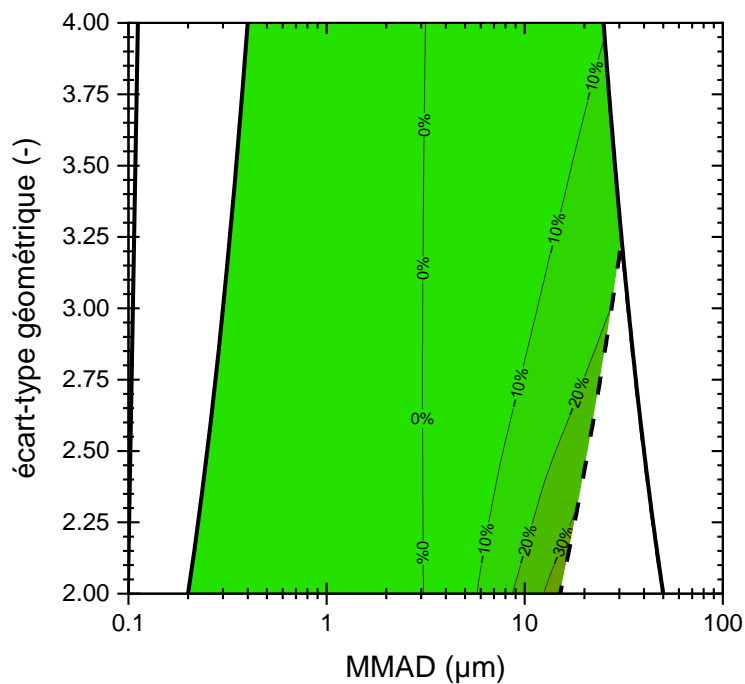


Figure 16 : Carte de biais du cyclone GS-1 à un débit de prélèvement de $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

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 $2,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} \pm 5 \%$.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

L'efficacité d'échantillonnage du cyclone Higgins-Dewell à $2,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ en fonction du diamètre aérodynamique des particules est présentée sur la Figure 17 (compilation des données provenant de différents travaux [23, 27-30] - débit de $2,1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ pour Maynard 1996 [28]).

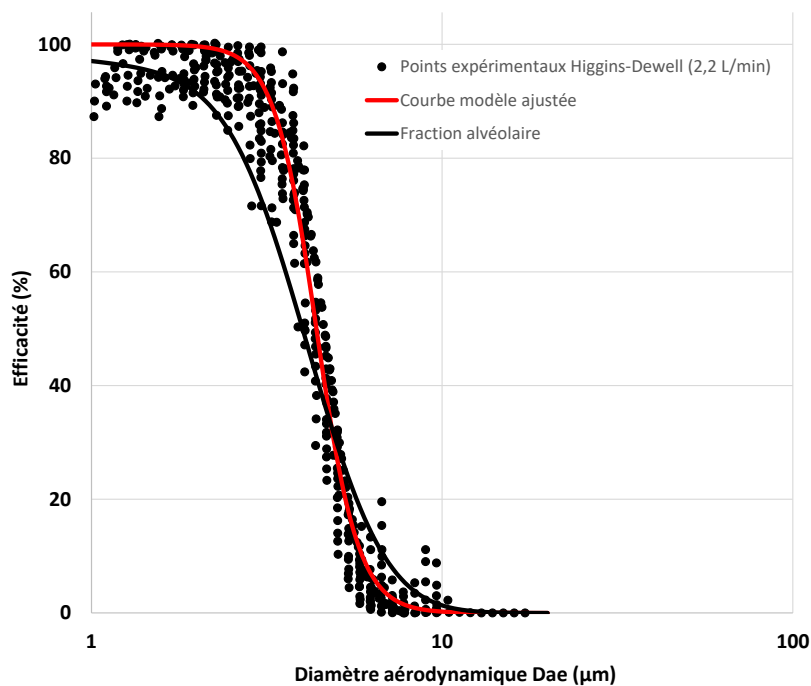


Figure 17 : Représentation graphique de la courbe modèle ajustée sur les points expérimentaux [23, 27-30] d'efficacité de sélection du cyclone Higgins-Dewell à un débit de prélèvement de $2,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Comparaison avec la courbe conventionnelle de la fraction alvéolaire.

La carte de biais du cyclone Higgins-Dewell à 2,2 L.min⁻¹ est représentée sur la Figure 18.

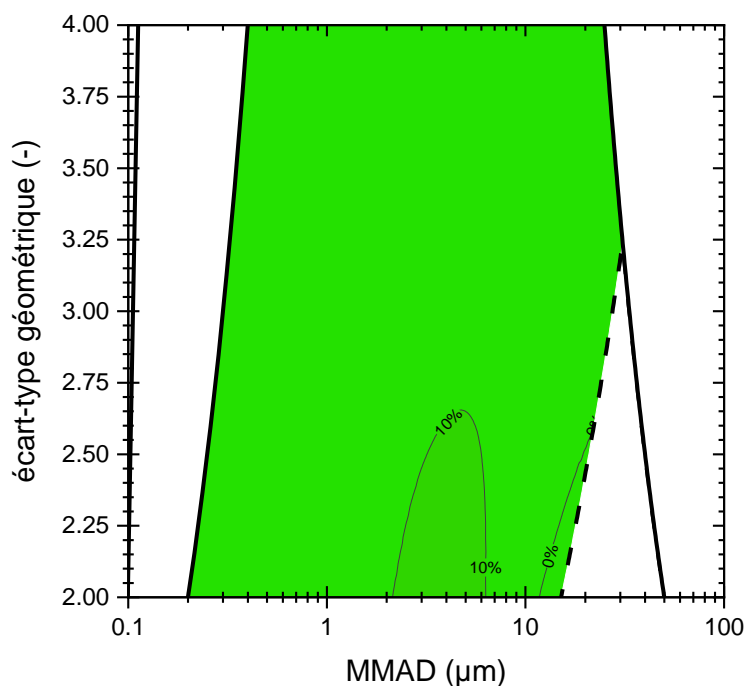


Figure 18 : Carte de biais du cyclone Higgins-Dewell à un débit de prélèvement de 2,2 L.min⁻¹.

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 Ø 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 L.min⁻¹ ± 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'efficacité d'échantillonnage du Dust cyclone à $2,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ en fonction du diamètre aérodynamique des particules est présentée sur la Figure 19 (compilation des données provenant de différents travaux [20, 24, 26, 27, 31, 32] - débits de 2,6 et 2,7 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ pour Harper et al 1998 [31] et Chen et Huang 1999 [24], respectivement).

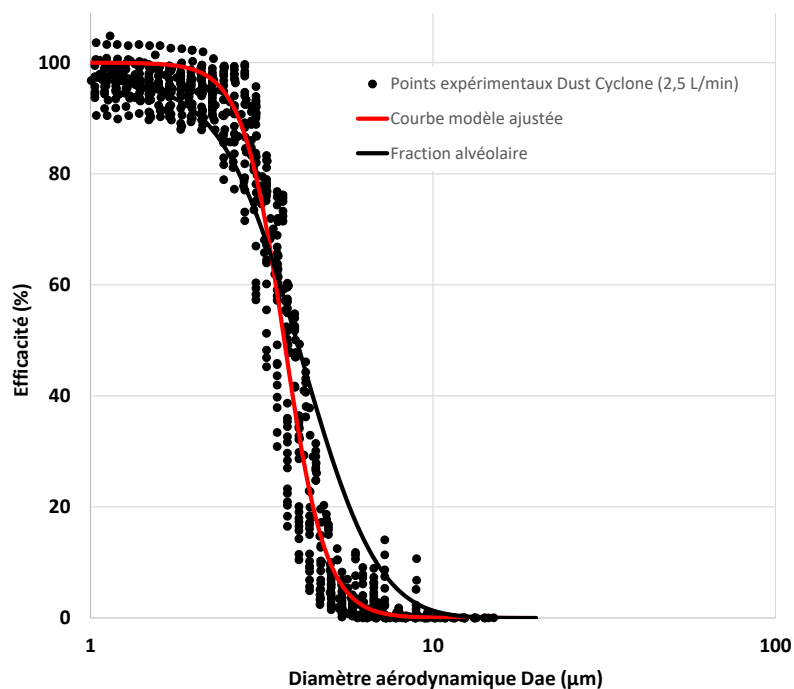


Figure 19 : Représentation graphique de la courbe modèle ajustée sur les points expérimentaux [20, 24, 26, 27, 31, 32] d'efficacité de sélection du Dust cyclone à un débit de prélèvement de $2,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Comparaison avec la courbe conventionnelle de la fraction alvéolaire.

La carte de biais du Dust cyclone à $2,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ est représentée sur la Figure 20.

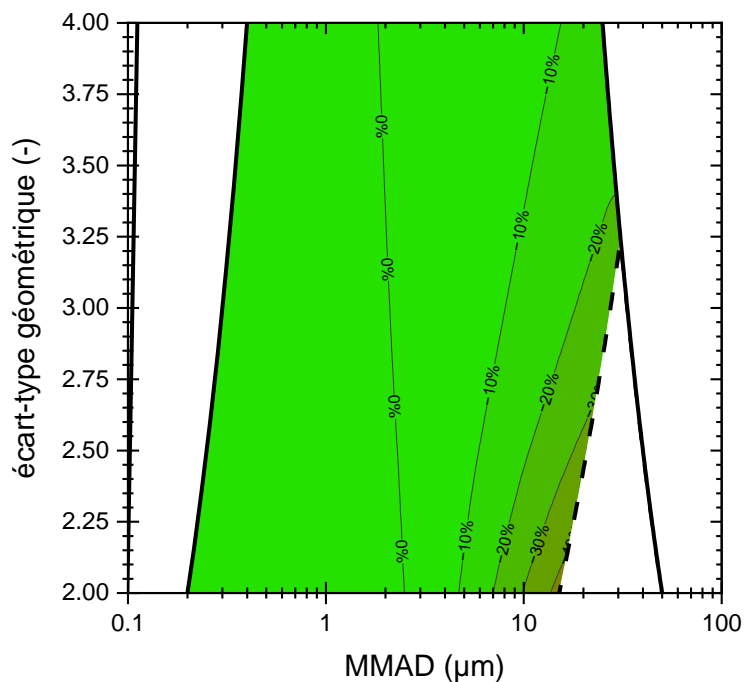


Figure 20 : Carte de biais du Dust cyclone à un débit de prélèvement de $2,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

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'efficacité d'échantillonnage du cyclone GS-3 à environ $2,75 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ en fonction du diamètre aérodynamique des particules est présentée sur la Figure 21 (compilation des données provenant de différents travaux [19, 26, 27] - débits de 2,6 et 2,8 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ pour Gautam et Sreenath 1997 [19] et Huang et al. 2019 [27], respectivement).

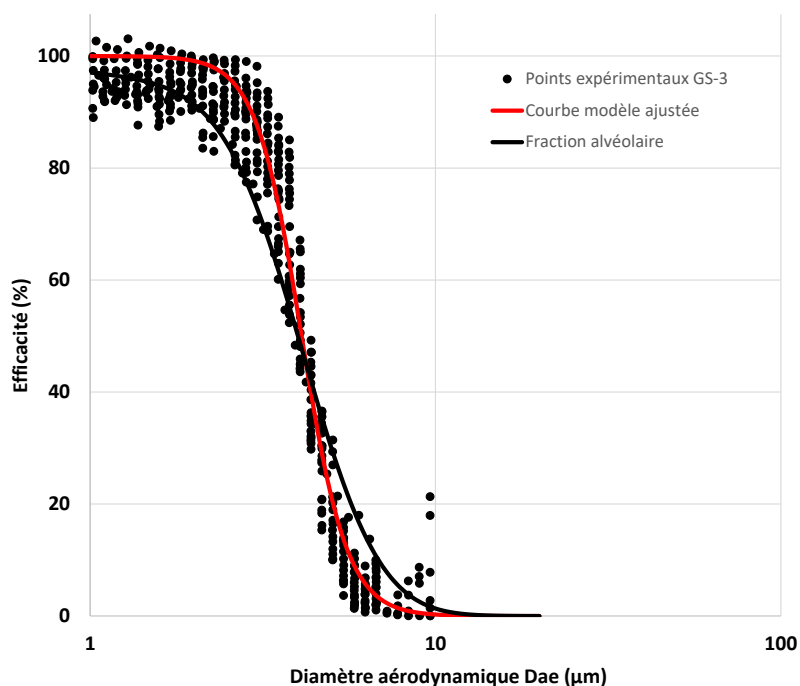


Figure 21 : Représentation graphique de la courbe modèle ajustée sur les points expérimentaux [19, 26, 27] d'efficacité de sélection du cyclone GS-3 à un débit de prélèvement d'environ $2,75 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Comparaison avec la courbe conventionnelle de la fraction alvéolaire.

La carte de biais du cyclone GS-3 à environ 2,75 L.min⁻¹ est représentée sur la Figure 22.

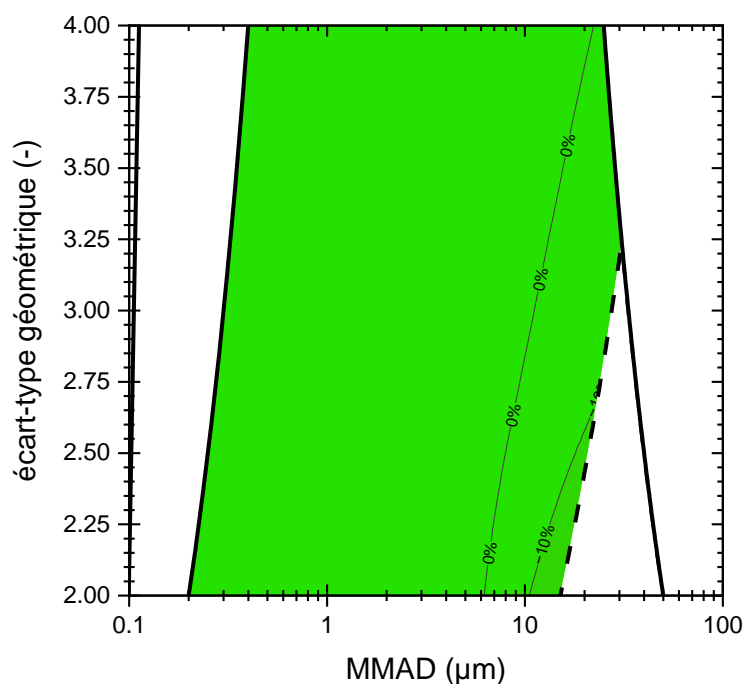


Figure 22 : Carte de biais du cyclone GS-3 à un débit de prélèvement d'environ 2,75 L.min⁻¹.

CYCLONE GK2.69

Le cyclone GK2.69 (Figures 3d et 23a) est conçu pour assurer la sélection de la fraction alvéolaire d'un aérosol. Une modification de son débit (1,6 L.min⁻¹) permet également de cibler la fraction thoracique.

Le dispositif complet comprend les éléments suivants :

- Cyclone GK2.69 (Figures 3d et 23a) fabriqué en aluminium ou en acier inoxydable.
- Cassette porte-filtre ouverte pour filtres de Ø 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 L.min⁻¹ ± 5 % pour la fraction alvéolaire et de 1,6 L.min⁻¹ ± 5 % pour la fraction thoracique.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

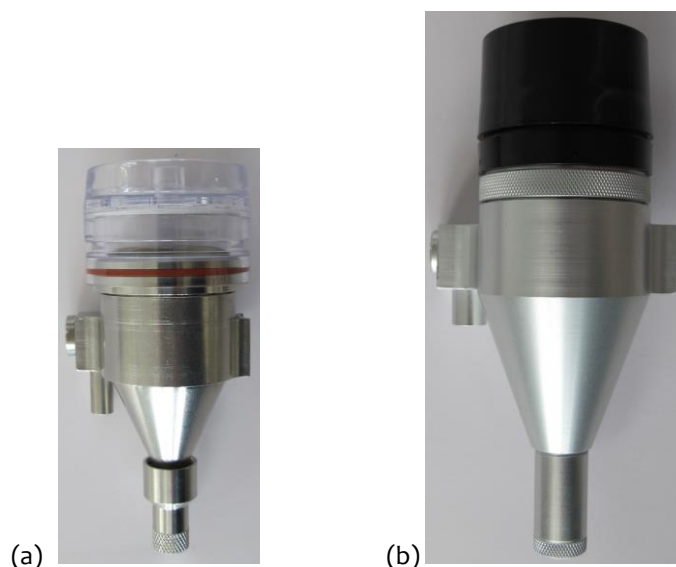


Figure 23 : Photographies d'illustration de cyclones de type Gussman-Kenny [33] :
(a) cyclone GK2.69 ; (b) cyclone GK4.162

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 24. 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.

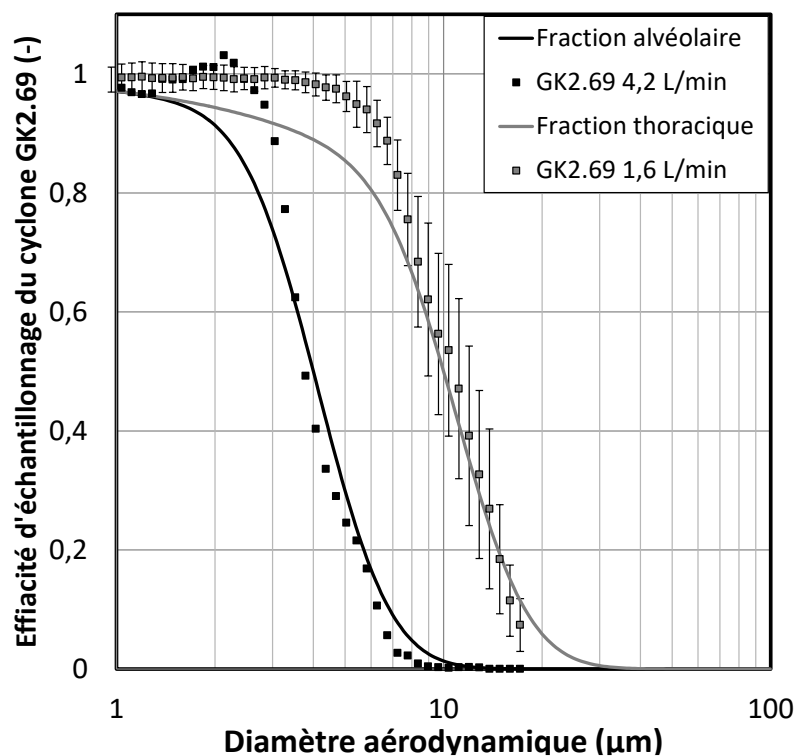


Figure 24 : Efficacités d'échantillonnage du cyclone GK2.69 pour des débits de 4,2 L.min⁻¹ (alvéolaire) et de 1,6 L.min⁻¹ (thoracique). Mesures INRS.

Le cyclone 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 données pour la fraction thoracique à un débit de 1,6 L.min⁻¹ sont par ailleurs confirmées par d'autres travaux [29, 40-43].

L'efficacité d'échantillonnage en fraction alvéolaire du cyclone GK2.69 à 4,2 L.min⁻¹ en fonction du diamètre aérodynamique des particules est présentée sur la Figure 25 (compilation des données provenant de différents travaux [33-36]).

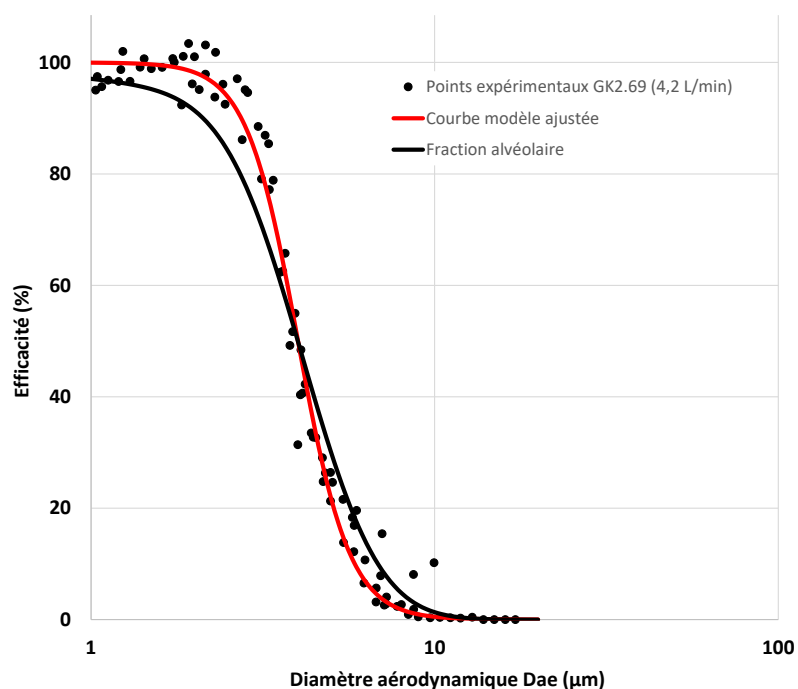


Figure 25 : Représentation graphique de la courbe modèle ajustée sur les points expérimentaux [33-36] d'efficacité de sélection du cyclone GK2.69 à un débit de prélèvement de 4,2 L.min⁻¹. Comparaison avec la courbe conventionnelle de la fraction alvéolaire.

La carte de biais du cyclone GK2.69 à $4,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (fraction alvéolaire) est représentée sur la Figure 26.

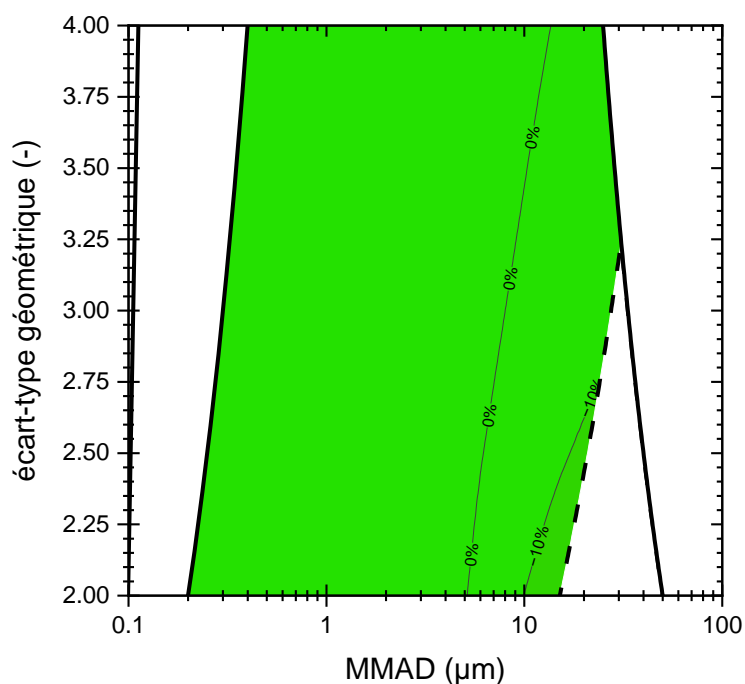


Figure 26 : Carte de biais du cyclone GK2.69 à un débit de prélèvement de $4,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

CYCLONE GK4.162 (RASCAL)

Le cyclone GK4.162 (Figure 23b) 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 23b).
- Cassette porte-filtre ouverte pour filtres de $\varnothing 47 \text{ mm}$ (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.

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 27. 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.

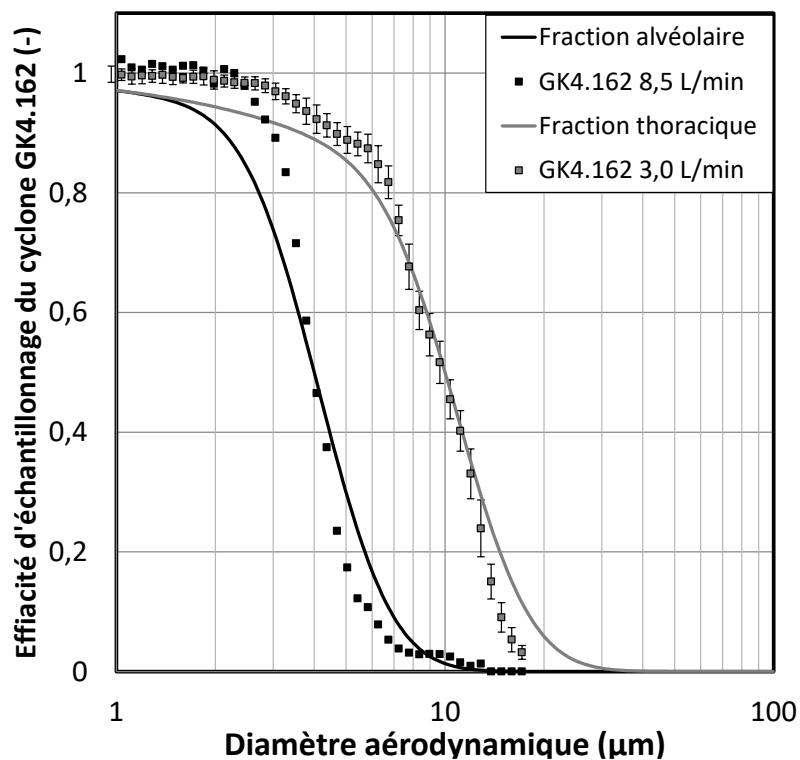


Figure 27 : Efficacités d'échantillonnage du cyclone GK4.162 pour des débits de 8,5 L.min⁻¹ (alvéolaire) et de 3,0 L.min⁻¹ (thoracique). Mesures INRS.

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 L.min⁻¹ et 3,0 L.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.

L'efficacité d'échantillonnage en fraction alvéolaire du cyclone GK4.162 à 8,5 L.min⁻¹ en fonction du diamètre aérodynamique des particules est présentée sur la Figure 28 (compilation des données provenant de différents travaux [36-38]).

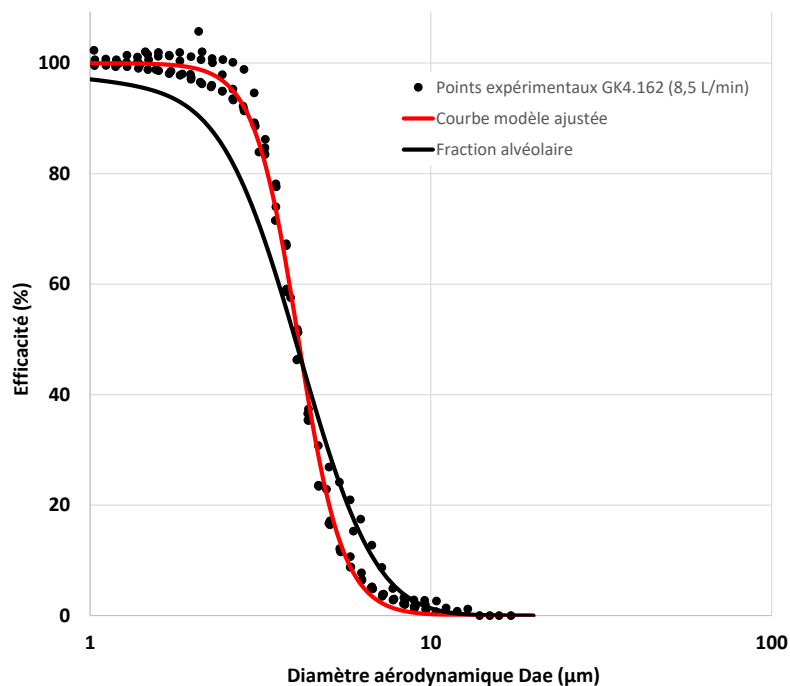


Figure 28 : Représentation graphique de la courbe modèle ajustée sur les points expérimentaux [36-38] d'efficacité de sélection du cyclone GK4.162 à un débit de prélèvement de 8,5 L.min⁻¹. Comparaison avec la courbe conventionnelle de la fraction alvéolaire.

La carte de biais du cyclone GK4.162 à 8,5 L.min⁻¹ est représentée sur la Figure 29.

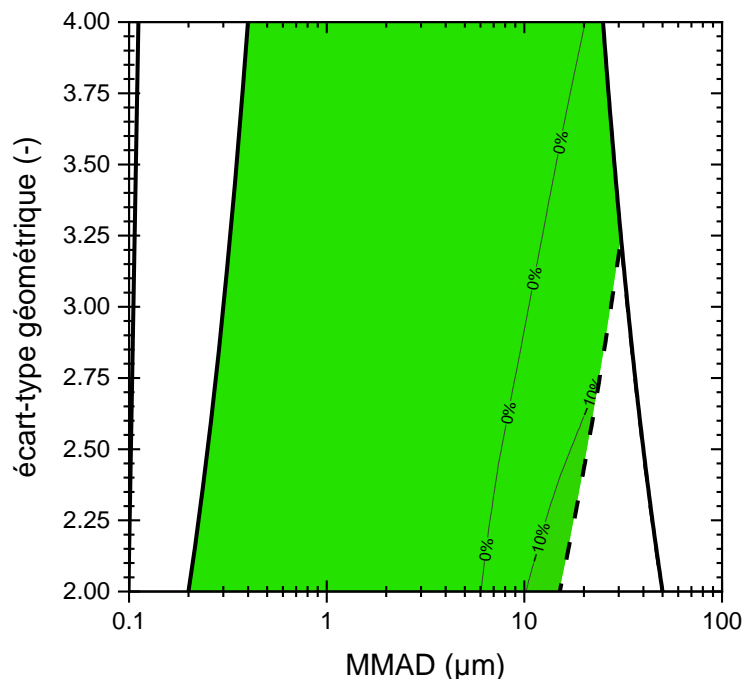


Figure 29 : Carte de biais du cyclone GK4.162 à un débit de prélèvement de 8,5 L.min⁻¹.

CYCLONE FSP-10

Le cyclone FSP-10 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 FSP-10 fabriqué en aluminium.
- Cassette porte-filtre dédiée pour filtres de \varnothing 37 mm.
- Filtre de prélèvement (suivant l'analyse envisagée).
- Pompe de prélèvement à un débit stabilisé de $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} \pm 5\%$ pour la fraction alvéolaire et de $3,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} \pm 5\%$ pour la fraction thoracique.
- Tuyau flexible de liaison entre la pompe et le cyclone.

Les efficacités d'échantillonnage du cyclone FSP-10, en fonction du diamètre aérodynamique des particules et pour les deux fractions thoracique et alvéolaire, sont présentées sur la Figure 30. 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.

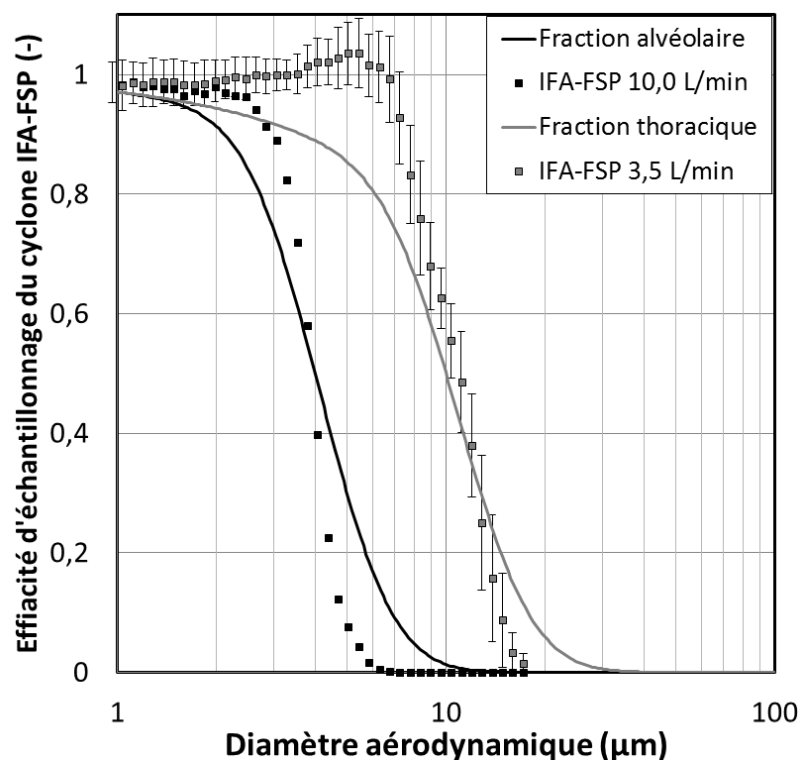


Figure 30 : Efficacités d'échantillonnage du cyclone FSP-10 pour des débits de $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (alvéolaire) et de $3,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (thoracique). Mesures INRS.

Le cyclone FSP-10 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 $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ et $3,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ permettent toutefois d'approcher de manière satisfaisante les diamètres de coupures recherchés de 4 et $10 \mu\text{m}$ et de sélectionner alternativement les fractions alvéolaire et thoracique.

L'efficacité d'échantillonnage en fraction alvéolaire du cyclone FSP-10 à 10 L.min⁻¹ en fonction du diamètre aérodynamique des particules est présentée sur la Figure 31 (compilation des données provenant de différents travaux [34, 36, 39, 40] - débit de 11,2 L.min⁻¹ pour certains points de Lee et al. 2010 [34]).

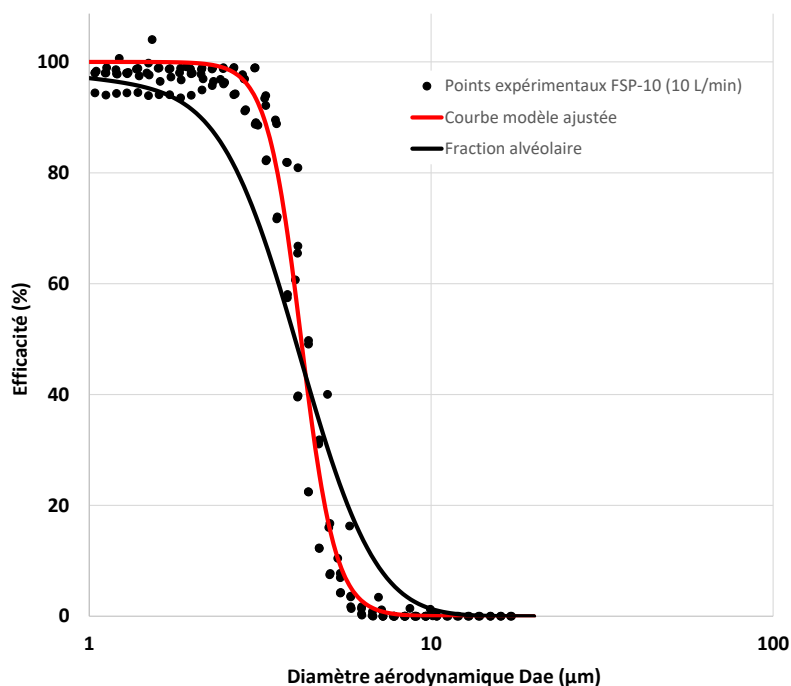


Figure 31 : Représentation graphique de la courbe modèle ajustée sur les points expérimentaux [34, 36, 39, 40] d'efficacité de sélection du cyclone FSP-10 à un débit de prélèvement de 10 L.min⁻¹. Comparaison avec la courbe conventionnelle de la fraction alvéolaire.

La carte de biais du cyclone FSP-10 à 10 L.min⁻¹ est représentée sur la Figure 32.

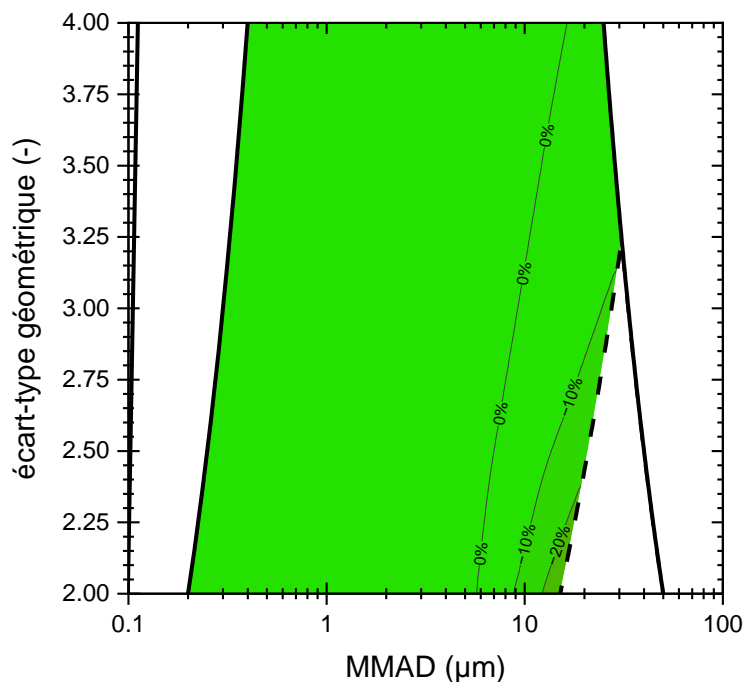


Figure 32 : Carte de biais du cyclone FSP-10 à un débit de prélèvement de 10 L.min⁻¹.

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 [44-46]. Ces travaux ont montré que les différences dans les concentrations massiques mesurées par chacun des cyclones étudiés étaient acceptables, inférieures à 30% ou moins en fonction des études et des cyclones comparés. 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 (norme en cours de révision). 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, 2024 (<https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-intervention-preparation/metropol-intervention-preparation.pdf>).
- [5] Prélèvement des aérosols par cassette fermée. INRS, fiche MétroPol, 2021 (<https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cassette/metropol-prelevement-cassette.pdf>).
- [6] NF EN 1540 (X 43-287). Décembre 2021. Expositions sur les lieux de travail – Terminologie. La Plaine Saint-Denis, AFNOR, 2021, 37 p.
- [7] NF EN ISO 13137 (X 43-282). Octobre 2022. 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, 2022, 31 p.
- [8] Principe général et mise en œuvre pratique du prélèvement. INRS, fiche MétroPol, 2018 (<https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-principe/metropol-prelevement-principe.pdf>).
- [9] Analyse gravimétrique. INRS, fiche MétroPol, 2024 (<https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-analyse-gravimetrique/metropol-analyse-gravimetrique.pdf>).
- [10] 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.
- [11] 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
- [12] 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, 2014, Partie 1 à Partie 6.

- [13] Prélèvement des aérosols - Généralités. INRS, fiche MétroPol, 2025 (<https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-generalite-aerosol/metropol-prelevement-generalite-aerosol.pdf>).
- [14] 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 2025).
- [15] ISO TR 7708 - Air quality - Particle size fractions definitions for the health-related sampling. Geneva. International Organization for Standardization, 1983, 13 p.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] GAUTAM M., SREENATH A. – Performance of a respirable multi-inlet cyclone sampler, *Journal of Aerosol Science*, 1997, 28:7, pp. 1265-1281.
- [20] 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.
- [21] ETTINGER H. J., PATRIDGE J. F., ROYER G. W. – Calibration of two stage samplers. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*, 1970, pp. 31, 537.
- [22] CAPLAN K.J., DOEMENY L.J., SORENSON S.D. – Performance characteristics of the 10 mm cyclone respirable mass sampler. Part 1 - Monodisperse studies. *Am. Ind Hyg. Assoc. J.*, 1977, 38, pp. 83-95.
- [23] TSAI C.J., SHIH T.S. – Particle collection efficiency of two personal respirable dust samplers. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1995, 56(9), pp. 911-918.
- [24] CHEN C.C., HUANG S.H. – Shift of aerosol penetration in respirable cyclone samplers. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1999, 60(6), pp. 720-729.
- [25] TSAI C.J., SHIAU H.G., LIN K.C., SHIH T.S. – Effect of deposited particles and particle charge on the penetration of small sampling cyclones. *J. Aerosol Sci.*, 1999, 30 (3), pp. 313-323.
- [26] 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>).
- [27] HUANG S.H., KUO Y.M., LIN C.W., CHEN T.J., LIU J., GUI H., CHEN C.C. – Development of respirable virtual-cyclone samplers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2019, 16(12), pp. 785-792.
- [28] MAYNARD A. – Sampling errors associated with sampling plate-like particles using the Higgins- and Dewell-type personal respirable cyclone. *Journal of Aerosol Science*, 1996, 27(4), pp. 575-585.
- [29] 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.
- [30] BELLE B. – Evaluation of gravimetric sampler bias, effect on measured concentration, and proposal for the use of harmonised performance based dust sampler for exposure assessment. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29, pp. 445-452.
- [31] 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.
- [32] LEACH W.A. – Effect of deposited polydispersed particles on respirable cyclone penetration. 2013. [University of Iowa]. <https://doi.org/10.17077/etd.hbmu5jac>

- [33] KENNY L.C., GUSSMAN R.A. – Characterization and modeling of a family of cyclone aerosol preseparator. *Journal of Aerosol Science*, 1997, 28, pp. 677–688.
- [34] 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(6), pp. 697-709.
- [35] LEE E.G., LEE T., KIM S.W., LEE L., FLEMMER M.M., HARPER M. – Evaluation of pump pulsation in respirable size-selective sampling: Part II. Changes in sampling efficiency. *Annals of Occupational Hygiene*, 2014, 58(1), pp. 74–84.
- [36] SIMON X., BOIVIN A., BAU S. – Efficacités d'échantillonnage des cyclones GK2.69, GK4.162 et IFA-FSP pour le prélèvement des fractions thoracique et alvéolaire, 31ème Congrès Français sur les Aérosols, Paris, 30-31 janvier 2018, <https://doi.org/10.25576/ASFERA-CFA2018-12584>.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Riediger (1998 – communication personnelle, données non publiées provenant du BIA - Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit).
- [40] 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.
- [41] MAYNARD A. – Measurement of aerosol penetration through six personal thoracic samplers under calm air conditions. *Journal of Aerosol Science*, 1999, 30, pp. 1227-1242.
- [42] LEE T., THORPE A., CAUDA E., HARPER M. – Calibration of high flow rate thoracic-size selective samplers, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2016, 13(6), pp. D93-D98.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.

HISTORIQUE ET AUTEURS

Version	Date	Modifications	Auteurs / Contributeurs
1	Octobre 2015	Création de la fiche	P. Görner, X. Simon, O. Witschger
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.	X. Simon, S. Bau, O. Witschger
2	Mai 2025	Révision importante de la fiche dont ajout d'un travail bibliographique sur les efficacités d'échantillonnage et représentation des cartes de biais pour huit cyclones.	X. Simon, S. Bau

CONTACT

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