

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger

Valeurs limites d'exposition en milieu professionnel

Poussières dites sans effet spécifique

Évaluation des méthodes de mesure

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Septembre 2020 - Édition scientifique

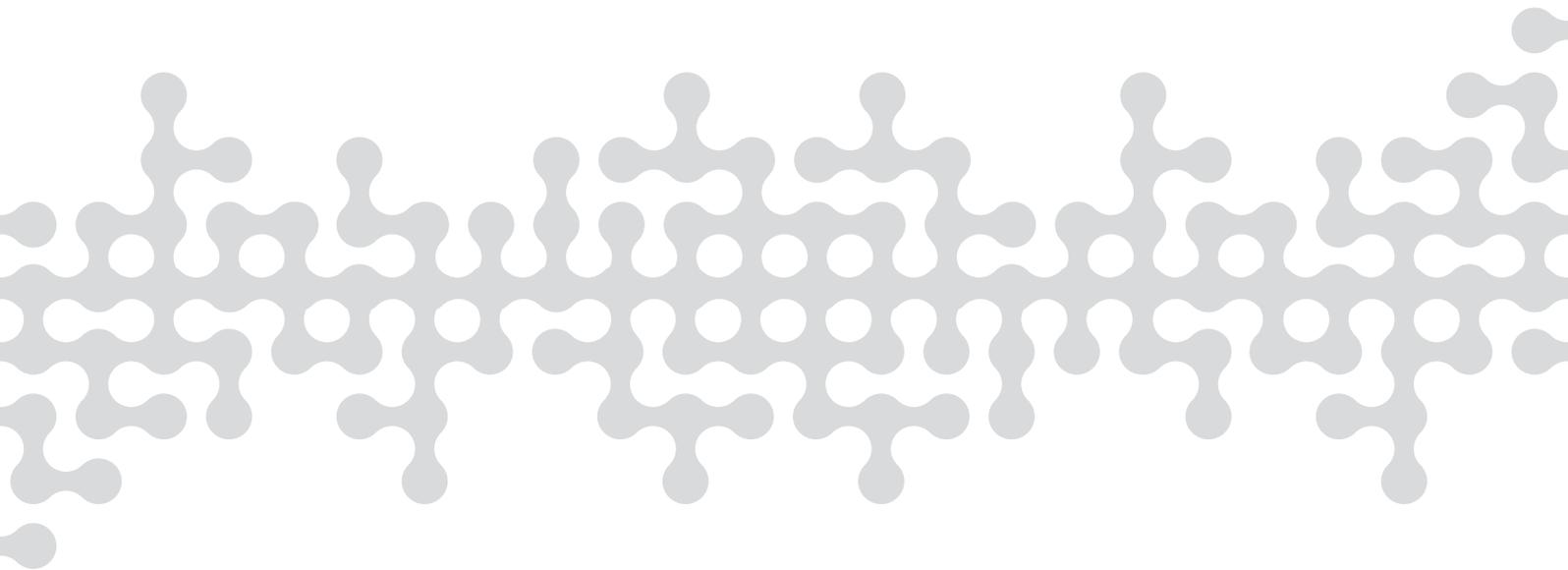


Valeurs limites d'exposition en milieu professionnel

Poussières dites sans effet spécifique
Évaluation des méthodes de mesure

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Septembre 2020 - Édition scientifique



Le Directeur général

Maisons-Alfort, le 14 septembre 2020

AVIS **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation,** **de l'environnement et du travail**

relatif à la proposition de valeurs limites d'exposition à des agents chimiques en milieu professionnel

**Évaluation des méthodes de mesure
dans l'air des lieux de travail pour les poussières dites sans effet spécifique (PSES)**

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

L'Anses a été saisie le 18 novembre 2015 par la direction générale du travail (DGT) afin de mener les travaux d'expertise nécessaires à la révision des valeurs limites d'exposition professionnelle pour les poussières dites sans effet spécifique (PSES), c'est-à-dire « qui ne sont pas en mesure de provoquer seules sur les poumons ou sur tout autre organe ou système du corps humain d'autre effet qu'un effet de surcharge » (circulaire DGT du 9 mai 1985).

La France dispose actuellement de valeurs réglementaires contraignantes pour les PSES (article R.4222-10 du code du travail) : une valeur moyenne d'exposition sur 8 heures en poussières totales de 10 mg.m⁻³ et une valeur moyenne d'exposition sur 8 heures pour les poussières alvéolaires de 5 mg.m⁻³.

Suite à la publication de l'avis de l'Anses relatif à la pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et des risques associés chez les travailleurs, la DGT a demandé à l'Anses de réévaluer ces valeurs,

Cette demande ayant été qualifiée de prioritaire, la démarche suivie pour recommander de nouvelles valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) s'est appuyée sur une analyse critique des rapports et expertises scientifiques internationaux déjà existants et pas sur une analyse de toute la littérature scientifique existante selon la méthodologie habituellement mise en œuvre.

L'Anses a publié en novembre 2019 un avis et un rapport d'expertise concernant uniquement les effets sanitaires liés à une exposition aux PSES et a recommandé à partir des expertises scientifiques existantes les valeurs limites d'exposition professionnelle suivantes :

- VLEP-8h pour la fraction inhalable : 4 mg.m⁻³
- VLEP-8h pour la fraction alvéolaire : 0,9 mg.m⁻³

Le présent document constitue une réponse à la partie relative à l'évaluation des méthodes de mesures des PSES au regard de ces recommandations et constitue un complément à la partie publiée en novembre 2019 recommandant des VLEP sur la base d'une analyse critique des rapports et expertises scientifiques internationaux déjà existants.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'Anses a confié l'instruction de cette saisine au comité d'experts spécialisés (CES) « Valeurs Sanitaires de référence » (ou CES VSR) et a mandaté le groupe de travail « Métrologie » pour l'évaluation des méthodes de mesures atmosphériques dans les lieux de travail.

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques.

Le présent avis se fonde pour les aspects scientifiques sur le rapport intitulé « Expertise en vue de la fixation de valeurs limites d'exposition à des agents chimiques en milieu professionnel – Évaluation des méthodes de mesure dans l'air des lieux de travail pour les poussières sans effet spécifique » (juin 2020).

Le CES VSR (mandat 2017-2020) a adopté le rapport ainsi que la synthèse et les conclusions de l'expertise collective le 19 mars 2020. Le rapport et la note d'expertise collective ont fait l'objet d'une consultation publique du 7 mai 2020 au 5 juin 2020. Aucun commentaire n'a été reçu lors de la consultation. Le CES VSR a adopté cette version finalisée le 26 juin 2020.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

■ Description de la méthode scientifique

Les différents protocoles de mesure des PSES dans l'air des lieux de travail ont été recensés et regroupés en fonction des méthodes mises en œuvre. Ces dernières ont ensuite été évaluées et classées au regard des exigences de performances indiquées notamment dans la norme NF EN 482 : « Atmosphère des lieux de travail – Exigences générales concernant les performances des modes opératoires de mesurage des agents chimiques » et des critères de décision détaillés dans le rapport « méthodologie d'évaluation des méthodes de mesure dans l'air des lieux de travail et l'air intérieur » (Anses, 2020). La liste des principales sources consultées est précisée dans ce rapport méthodologique. Le classement des méthodes est réalisé de la manière suivante :

- catégorie 1A : méthodes reconnues et validées (l'ensemble des critères de performance sont satisfaits) ;

- catégorie 1B : méthodes partiellement validées (les critères essentiels de performance de sont satisfaits) ;
- catégorie 2 : méthodes indicatives (des critères essentiels de validation ne sont pas suffisamment explicités, ou bien la méthode nécessite des ajustements devant faire l'objet d'une validation) ;
- catégorie 3 : méthodes non recommandées (des critères essentiels de validation sont absents ou inappropriés). Cette catégorie englobe les méthodes inadaptées pour lesquelles des critères essentiels de validation ne sont pas remplis et les méthodes non évaluables (désignées par la catégorie 3*) pour lesquels des critères essentiels de validation ne sont pas documentés.

Une étude comparative et détaillée des méthodes classées en catégorie 1A, 1B et 2 est réalisée au regard des différentes données de validation et de la faisabilité technique, de manière à recommander la ou les méthodes les plus appropriées pour la mesure des concentrations aux fins de comparaison aux VLEP.

Concernant la mesure de la concentration en PSES, certains critères d'évaluation ne s'appliquent pas : détermination du débit d'échantillonnage pour les supports passifs, interférences, rendement d'adsorption/désorption. Les critères essentiels à considérer portent sur la conformité des dispositifs de prélèvement à la fraction conventionnelle inhalable ou alvéolaire, l'influence des conditions environnementales, la capacité de piégeage, les limites de quantification, l'étendue de mesure et les incertitudes.

C'est pourquoi, une analyse des performances des dispositifs de prélèvements, décrits dans les protocoles recensés, (Cf. Annexe 1) au regard des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire a été réalisée dans un premier temps. Une revue de la littérature a également été réalisée afin de compléter ces données (requêtes effectuées sur la base Scopus, en décembre 2017 et mars 2018, mots clés : « aerosol, sampler, inhalable, respirable, occupational, internal, capsule, accu-cap », sans restriction de date). L'évaluation des performances des dispositifs de prélèvement vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable ou alvéolaire a été réalisée à partir de l'ensemble de ces données (protocoles + littérature) en s'attachant à évaluer et analyser le biais de chaque préleveur vis-à-vis de la courbe conventionnelle. Les limites de quantification, la capacité de piégeage et l'étendue de mesure ont ensuite été évaluées au travers des performances liées à la gravimétrie.

■ Conclusions et recommandations de l'expertise collective

La mesure de la concentration en PSES à des fins de comparaison avec la VLEP-8h inhalable ou alvéolaire consiste à effectuer un prélèvement d'aérosol puis une analyse gravimétrique.

Différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable et de la fraction alvéolaire sont décrits au travers des protocoles recensés. Les performances de ces dispositifs quant à leur efficacité de collecte vis-à-vis des conventions inhalable et alvéolaire ont été déterminées dans des études expérimentales de laboratoire. Divers paramètres, notamment la nature des poussières et les conditions environnementales (distribution granulométrique, taux d'empoussièrement, vitesse d'air, orientation du dispositif) influent sur les efficacités d'échantillonnage au regard des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire.

Sur la base des normes et protocoles existants ainsi que des études expérimentales, les différents dispositifs présentent des efficacités d'échantillonnage variables, dépendantes de la granulométrie de l'aérosol et des conditions environnementales notamment la vitesse d'air et l'orientation du dispositif.

Aucun dispositif ne répond parfaitement aux exigences en termes d'efficacité d'échantillonnage au regard de la fraction conventionnelle inhalable ou alvéolaire dans

toutes les situations environnementales et sur l'ensemble de la plage granulométrique d'intérêt.

Dans l'intérêt de la prévention, le CES a fait le choix de favoriser les dispositifs qui surestiment les fractions conventionnelles considérées (et donc de déclasser ceux qui sous-estiment ces mêmes fractions).

VLEP-8h – fraction inhalable :

Concernant les dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable évalués au regard du critère « conformité à la fraction conventionnelle inhalable » :

- **la CFC seule, le PAS-6 et le CIP 10-I-V1 sont classés en catégorie 3 et ne sont donc pas recommandés pour le prélèvement de la fraction inhalable.** En effet :
 - o la CFC seule, bien qu'elle soit la plus proche de la fraction conventionnelle pour des aérosols de granulométrie $< 20-30 \mu\text{m}$, présente un sous-échantillonnage important à partir de $20-30 \mu\text{m}$, quelle que soit la vitesse d'air. Ce sous-échantillonnage est le plus important de tous les dispositifs évalués. Il est noté une diminution de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air les plus faibles et supérieures ou égales à $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ce dispositif de prélèvement est également particulièrement sensible à l'orientation, tant dans un plan horizontal que vertical. L'efficacité de collecte de la CFC (seule) n'est donc pas satisfaisante ;
 - o le comportement du PAS-6 vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable à des vitesses d'air inférieures à $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ n'a pas été étudié, ni l'influence de l'orientation de ce dispositif vis-à-vis du flux d'air sur l'efficacité de prélèvement ;
 - o le CIP10-I-V1 a fait l'objet de modification dans sa conception afin d'améliorer ses performances. La version 2 présente une efficacité d'échantillonnage supérieure et un biais vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable moins important.
- **Le Button, la CFC + capsule interne, le CIP10-I-V2, le GSP-3.5, l'IOM et le 7-Hole sont classés en catégorie 2 et sont recommandés pour le prélèvement de la fraction inhalable.** En effet :
 - o les biais observés dans les conditions proches de l'air des lieux de travail (vitesse d'air $\leq 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) vis-à-vis de la convention sont moindres que ceux observés avec la CFC seule ;
 - o la sous-estimation de la fraction conventionnelle débute pour des particules de tailles plus grandes (environ 40 à $50 \mu\text{m}$ pour le GSP-3,5 et la CFC + capsule interne contre $20-30 \mu\text{m}$ la CFC seule) ;
 - o le Button semble être plus précis et moins sensible à la vitesse d'air que les autres dispositifs ;
 - o le Button et l'IOM ont tendance à surestimer la fraction conventionnelle. Le 7-Hole la surestime dans des conditions d'orientation face au flux d'air et pour des vitesses d'air faibles.

Concernant l'analyse gravimétrique, celle-ci n'est pas un facteur limitant à condition d'utiliser des membranes PVC et filtres en fibres de quartz pour les dispositifs autres que le CIP10 I-V2 et ce, à condition de respecter également les recommandations en matière de pesée décrites dans le paragraphe 4.3.1 du rapport d'expertise collective. **Les différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable permettent tous de couvrir les domaines de 0,1 à 2*VLEP-8h définie pour la fraction inhalable, avec des prélèvements de 8 heures ou bien 2 prélèvements successifs de 4 heures. Les membranes en PVC sont à privilégier en raison de la potentielle perte de fibres lors des manipulations des filtres en fibres de quartz ou de verre.**

VLEP-8h – fraction alvéolaire :

Concernant les dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire évalués au regard du critère « conformité à la fraction conventionnelle » :

- **les cyclones GS-1 et la coupelle CIP-10-R sont classés en catégorie 3 et ne sont donc pas recommandés pour la mesure de la fraction alvéolaire.** En effet :
 - o le dispositif GS-1 n'a pas fait l'objet d'études expérimentales pour évaluer ses performances ;
 - o le CIP10-R présente une faible efficacité de collecte des particules de diamètre inférieur à 2 µm.
- **les cyclones Higgins-Dewell (HD) qui se distinguent par des géométries et débits différents, Dorr-Oliver (DO), GK2.69 et 4.162, AI, GS-3 sont classés en catégorie 2 et sont recommandés pour la mesure de la fraction alvéolaire.** En effet :
 - o des écarts peu importants à la courbe conventionnelle sont observés avec une surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm ;
 - o les méthodes de prélèvement les plus décrites et utilisées mettent en œuvre des cyclones (HD, DO, AI, GS-3). Une optimisation du débit d'échantillonnage a été étudiée pour ces dispositifs pour une meilleure comparaison à la fraction conventionnelle alvéolaire en améliorant les performances et est recommandée dans le cadre de cette expertise ;
 - o lorsque des cassettes sensibles aux charges électrostatiques sont utilisées, des dépôts sur les parois sont possibles ;
 - o les cyclones Higgins Dewell HD (SIMPEDS, FSP2, Casella plastic, SKC plastic cyclone, BGI4L, FSP10) n'ont pas fait l'objet d'études sur l'orientation du dispositif, l'influence de l'humidité relative et les types, concentration et charge électrostatique de l'aérosol contrairement au cyclone DO ;
 - o les dispositifs cyclone à haut débit (FSP10, GK2.69 et GK 4.162) peuvent induire une perte de charge plus importante et peuvent être plus contraignants en raison du poids plus important de la pompe de prélèvement.

Concernant l'analyse gravimétrique :

- les supports PVC de diamètre 25 mm sont appropriés et permettent d'atteindre quasiment systématiquement 0,1 fois la VLEP-8h pour l'ensemble de la gamme de valeurs de LQ et de débits retenus. La seule exception correspond aux débits de 1,5 et 1,7 L.min⁻¹ pour lesquels la LQ doit être optimisée ;
- les membranes PVC de diamètre 37 mm ainsi que les filtres en fibres de verre ou de quartz (diamètre 25 ou 37mm) conviennent si la limite basse de la gamme des valeurs de LQ retenues est prise en compte ;
- les filtres en fibres de quartz ou de verre ne sont pas à privilégier pour une analyse gravimétrique en raison d'une sensibilité à l'humidité et à la « dégradation » (pertes de fibres lors des manipulations) ;
- concernant les mousses PU, la limite de quantification ne permet pas d'atteindre le dixième de la VLEP-8h ;

Les dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire permettent donc de couvrir les domaines de 0,1 à 2*VLEP-8h, à condition de respecter les recommandations en matière de pesée décrites dans le paragraphe 4.3.1 du rapport d'expertise collective avec des prélèvements de 8 heures ou bien 2 prélèvements successifs de 4 heures. Seul le CIP10-R ne permet pas de couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h définie pour la fraction alvéolaire.

Concernant les dispositifs d'échantillonnage simultané des fractions inhalable et alvéolaire, aucune étude expérimentale n'a évalué leur efficacité d'échantillonnage vis-à-vis des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire. Ces dispositifs n'ont pas pu être évalués

et sont donc classés en catégorie 3^(*). Ils ne sont donc pas recommandés tant pour la mesure de la fraction inhalable que pour la mesure de la fraction alvéolaire.

Ainsi, compte tenu des données actuellement disponibles de comparaison des performances d'échantillonnage vis-à-vis des fractions conventionnelles et de l'évaluation des performances en terme de gravimétrie, le CES recommande pour la mesure de la concentration en PSES aux fins de comparaison avec les VLEP-8h établies par le CES, les dispositifs de prélèvement des fractions inhalable et alvéolaire suivants tout en gardant bien à l'esprit leurs limites spécifiques d'utilisation rappelées dans les tableaux ci-dessous. Ces méthodes de mesures sont classées en catégorie 2, considérées comme indicatives et nécessitant de vérifier leurs performances pour l'environnement dans lequel elles doivent être mises en œuvre.

^(*) Dispositif de prélèvement non évaluable en l'absence de données de validation

Tableau 1 : Méthodes recommandées pour la mesure des PSES au regard de la VLEP-8h définie pour la fraction inhalable

| Dispositif de prélèvement | Protocoles / Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|---------------------------|--|-----------------|-------------|-----------------|--|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| Button | FD CEN/TR 15230 HSE MDHS 14-4, INHST CR 003 A06, INSHT MTA/MA 014/A11 Li et al., 2000 Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000b Aizenberg et al., 2001 Witschger et al. 2004 Görner et al., 2010 Sleeth et al., 2012 | 2 | 1B | 2 | Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles Légère augmentation de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$ Gravimétrie : utilisation de filtre PVC 25 mm - | Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h |
| CFC + capsule interne | NIOSH 0501, INRS MétroPol M-274, INRS MétroPol cassette, NF X43-257 Görner <i>et al.</i> , 2010 | 2 | 1A | 2 | Effet de l'inclinaison non étudié. Sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 μm Biais moins important avec la courbe conventionnelle inhalable aux vitesses d'air faibles. L'efficacité de prélèvement n'a pas été étudiée pour des vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$. | 8h |
| CIP-10 I V2 | MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 IRSST MA-373 INHST MTA/MA_014_A11 Görner <i>et al.</i> , 2009 Görner <i>et al.</i> , 2010 | 2 | 1A | 2 | Sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 μm Diminution de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air faibles (sous-estimation plus importante) Augmentation de l'efficacité de prélèvement à 1 m.s^{-1} (diminution du biais vis-à-vis de la fraction | 8h |

| Dispositif de prélèvement | Protocoles / Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|---------------------------|---|-----------------|-------------|-----------------|---|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| | | | | | conventionnelle inhalable) Gravimétrie : le dixième de la VLEP-8h est obtenu avec la limite basse de la LQ. | |
| GSP-3.5 / CIS | BIA 7284 DFG MAK sampling and determining aerosols FD CEN/TR 15230 MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 INSHT MTA/MA_014_A11 Kenny et al. 1997 Li et al., 2000 Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000a Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000b Aizenberg et al., 2001 Sleeth et al., 2012 | 2 | 1B | 2 | Sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 µm. Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles Aux vitesses d'air ≥ 1 m.s ⁻¹ , augmentation ou diminution de l'efficacité de prélèvement selon l'orientation (face au flux d'air ou moyennée) Dépôt sur les parois pouvant être important pour les diamètres aérodynamiques équivalents les plus élevés. | Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h |
| IOM | MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 IRSST MA-373 INHST MTA/MA_014_A11 Kenny, Aitken, et al., 1997 Kenny et al., 1999 Li et al., 2000 Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000a Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000b Aizenberg et al., 2001 Paik et al., 2004 Görner et al., 2009 | 2 | 1A | 2 | Possible captation de grosses particules émises dans certains procédés via l'ouverture du dispositif Sur-échantillonnage des particules de diamètre supérieur à 70 µm Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles. Aux vitesses d'air ≥ 1 m.s ⁻¹ , augmentation ou diminution de l'efficacité de prélèvement selon l'orientation (face au flux d'air ou moyennée) | 8h |

| Dispositif de prélèvement | Protocoles / Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|---|---|-----------------|-------------|-----------------|--|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| | Witschger et al., 2004 Görner et al., 2010 Sleeth et al., 2012 | | | | | |
| 7-hole | HSE MDHS 14/4 Kenny, Aitken, <i>et al.</i> , 1997 Kenny et al., 1999 Li et al., 2000 | 2 | 1A | 2 | Légère sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-delà de 30 µm à 0,5 m.s⁻¹ mais surestimation à des vitesses d'air plus faibles. Surestimation dans des conditions d'orientation face au flux d'air | 8h |
| (*) conformité du dispositif de prélèvement à la fraction conventionnelle inhalable | | | | | | |

Tableau 2 : Méthodes recommandées pour la mesure des PSES au regard de la VLEP-8h définie pour la fraction alvéolaire

| Dispositif de prélèvement | Protocoles/Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|---------------------------|--|-----------------|-------------|-----------------|--|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| Cyclone DO | MétroPol Cyclone (2019) INSHT MTA-MA014/A11 OSHA PV 2121 Niosh 0600 NF X 43-259 FD CEN 15230 Lidén & Kenny, 1993 Kar <i>et al.</i> , 1995 Gautam <i>et al.</i> , 1997 Chen <i>et al.</i> , 1999 ; Tsai <i>et al.</i> , 1999 Görner <i>et al.</i> , 2001 | 2 | 2 | 2 | Surestimation pour des particules de tailles de 1 à 4 µm et sous-estimation pour les particules de tailles comprises entre 4 et 10 µm ↓ D ₅₀ et ↑ Biais avec des vitesses d'air élevées et des orientations du dispositif à 90 et 180° Problématique de dépôt sur les parois, d'effet de charges électrostatiques Gravimétrie : optimisation des LQ nécessaires pour atteindre 0,1*VLEP-8h | Nécessité de réaliser 1 prélèvement de 8h |
| Cyclone AI | Niosh 0600 FD CEN 15230 Chen <i>et al.</i> , 1999 Tsai <i>et al.</i> , 1999 Görner <i>et al.</i> , 2001 | 2 | 1A | 2 | Surestimation pour des particules de tailles de 1 à 4 µm et sous-estimation pour les particules de tailles comprises entre 4 et 10 µm Pas d'influence du dépôt sur les parois, ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol | 8h |
| Cyclone GS3 | MétroPol Cyclone (2019) HSE MDHD 14/4 FD CEN 15230 INSHT MTA-MA014/A11 Gautam <i>et al.</i> , 1997 Chen <i>et al.</i> , 1999 | 2 | 1B | 2 | Surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm Pas de différence en fonction de l'orientation du dispositif ↑ Biais à une vitesse d'air très élevée Pas d'effet de dépôt sur les parois ni de charges électrostatiques | nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4 h. |

| Dispositif de prélèvement | Protocoles/Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h | | | |
|--|-----------------------|--|-------------|-----------------|---------|---|---|--|--|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | | | | |
| eCyclone HD | FSP 10 | IFA 6068 DFG MAK Lee <i>et al.</i> , 2010 | 2 | 1B | 2 | Perte de charge du fait du haut débit | Surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm | Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h | |
| | SIMPEDS – FSP2 | NIOSH 0600 HSE MDHS 14/4 Görner <i>et al.</i> , 2001 Liden & Kenny 1993 | 2 | | | | | | - |
| | SKC Plastic | SKC Plastic cyclone notice (2019) | 2 | | | | | | - |
| Cyclone GK | GK 2.69 | HSE MDHS 14/4 FD CEN 15230 Kenny & Gussman, 1997 Lee <i>et al.</i> , 2010 | 2 | 1B | 2 | Perte de charge du fait du haut débit | Surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm | Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h | |
| | GK 4.162 | Thorpe, 2011 | 2 | 1B | 2 | | | | Pas d'études concernant des vitesses d'air élevées, ni l'influence de l'orientation du dispositif, de l'humidité relative, ni du type, concentration de l'aérosol. |
| (*) conformité du dispositif de prélèvement à la fraction conventionnelle alvéolaire | | | | | | | | | |

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions et recommandations du CES « Valeurs sanitaires de référence ».

Dr Roger GENET

MOTS-CLES

Poussières sans effet spécifique (PSES), fraction inhalable, fraction alvéolaire, aérosols, air des lieux de travail, VLEP, valeurs limites, métrologie, méthodes de mesure, lieux de travail, milieu professionnel

KEY WORDS

Dust without specific effect (DWSE), inhalable fraction, respirable fraction, aerosols, workplace air, OEL, limit values, metrology, measurement methods, workplaces, occupational environment

ANNEXE 1 : DISPOSITIFS DE PRELEVEMENT IDENTIFIES DANS LES PROTOCOLES RECENSES

| Dispositif de prélèvement | Fraction d'intérêt | Support de prélèvement | Débit de prélèvement (L.min ⁻¹) | Protocoles | |
|-----------------------------|---------------------------------------|---|--|---|-------------------|
| Button | Inhalable | Membrane PVC ou en ester de cellulose (EC) diamètre 25mm | 4 | FD CEN/TR 15230, HSE MDHS 14-4, INHST CR 003 A06, INSHT MTA/MA 014/A11 | |
| Cassette fermée 37 mm (CFC) | Inhalable Fraction totale (US-Canada) | Membrane PVC 37 mm, filtres en fibres de verre ou fibres de quartz, membrane en ester de cellulose (MCE), téflon | 1 à 2 | INRS MétroPol M-274 + INRS MétroPol cassette fermée, NIOSH 0500, IRSST 48-1, NF X43-257 | |
| CFC et capsule interne | Inhalable | Membrane PVC 37mm (2 à 5µm), soudée à une capsule en PVC Capsule soudée à une membrane en EC | 1 à 2 | NIOSH 0501, INRS MétroPol M-274, INRS MétroPol cassette, NF X43-257 | |
| CIP 10-I V.1 ou V.2 | Inhalable | Mousse polyuréthane | 10 | INRS MétroPol M-279, INRS MétroPol M-281, INRS MétroPol CIP 10, FD CEN/TR 15230, INHST CR-03/2006, INSHT MTA/MA 014/A11 | |
| Flying Saucer 37 mm | Inhalable | Membrane PVC 37 mm | 2 | OSHA PV 2121 | |
| GSP-3,5 ¹ ou CIS | Inhalable | Filtre en fibres de verre 37 mm | 3,5 | HSE MDHS 14/4, INHST CR-03/2006, INSHT MTA/MA 014/A11, FD CEN/TR 15230, BIA 7284, DFG MAK sampling aerosols | |
| GSP-10 ² | inhalable | Filtre en fibres de verre 37 mm | 10 | INSHT MTA/MA 014/A11, BIA 7284, FD CEN/TR 15230 | |
| IOM | Inhalable | Filtre diamètre 25 mm + porte filtre (en plastique conducteur ou en acier inoxydable). Filtres en fibres de verre, membrane en ester de cellulose (MCE), PVC, polycarbonate ou gélatine. | 2 | HSE MDHS 14/4, FD CEN/TR 15230, INHST CR-03/2006, INSHT MTA/MA 014/A11 IRSST MA-373 | |
| PAS-6 | Inhalable | Filtre de 25 mm | 2 | FD CEN/TR 15230, INHST CR 003 A06, INSHT MTA/MA 014/A11 | |
| 7-hole (ou multi-orifice) | Inhalable | Filtre de 25 mm | 2 | HSE MDHS 14/4 | |
| Cyclone DO | Alvéolaire | Membrane PVC 37 mm (5µm), filtres en fibres de verre ou fibres de quartz 37m | 1,7 | MétroPol 278, INSHT MTA-MA 014-A11, OSHA PV2121, NIOSH 0600, FD CEN/TR 15230 Lidén & Kenny (1993), Görner et al., 2001, Gautam et al., 1997 | |
| | | | Optimisé : 1,5 | | |
| Cyclones Higgins-Dewell | FSP 10 | Alvéolaire | Membrane EC 37mm (8µm), Membrane PVC 37 mm (5µm), Filtres en fibres de verre 37mm ou 25 mm | 10 | DFG MAK, IFA 6065 |
| | | | | Optimisé : 11,2 | Lee et al. (2010) |

¹ Parfois également noté PGP-GSP (FD CEN/TR 15230)

² Egalement noté PGP-GSP10 (FD CEN/TR 15230)

| Dispositif de prélèvement | | Fraction d'intérêt | Support de prélèvement | Débit de prélèvement (L.min ⁻¹) | Protocoles |
|--|---------------------------------------|--------------------|--|---|--|
| | SIMPEDS – FSP2 | | | 2,2 | NIOSH 0600, HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230, INSHT MTA-MA 014-A11 |
| | SKC Plastic | | | 3 | SKC Plastic cyclone notice (2019) |
| Cyclone GS1 | Alvéolaire | Alvéolaire | Membrane EC 37mm (8µm), Membrane PVC 37 mm (5µm), Filtres en fibres de verre 37mm ou 25 mm | 2 | HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230, INSHT MTA-MA 014-A11 |
| Cyclone GS3 | | | | 2,75 Optimisé : 2,5-2,6 | HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230, INSHT MTA-MA 014-A11 |
| Cyclone GK2.69 | Alvéolaire | | Membrane EC 37mm (8µm), Membrane PVC 37 mm (5µm), Filtres en fibres de verre 37mm | 4,2 | HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230, INSHT MTA-MA 014-A11 |
| | | | | Optimisé : 4,4 | Kenny & Gussman (1997), Lee et al. (2010) |
| GK 4.162 | Alvéolaire | | | 9 | Thorpe (2011) |
| Cyclone AI | Alvéolaire | | Membrane PVC 37 mm (5µm), Filtre en fibres de verre 25 mm | 2,5 2,67 | NIOSH 0600, HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230 Chen et al. (1999) |
| CIP 10-R | Alvéolaire | | Mousse polyuréthane | 10 | Metropol 281 + Fiche MétroPol CIP 10, FD CEN/TR 15230, DFG MAK |
| Échantillonneurs haut débit (PGP10 ³ , cyclone BGI GK4.162, impacteur PPI8) | | Alvéolaire | Filtre PVC 37-mm (5.0-µm) | 8 à 10 | HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230 |
| CIS multi-fraction respirable | Inhalable Thoracique Alvéolaire | | Filtre en fibres de verre 37 mm + mousses polyuréthane | 3,5 | HSE MDHS 14/4 |
| IOM 'multidust' ou Dual fraction respirable | Inhalable Alvéolaire | | Mousse polyuréthane et filtre de 25 mm dans le porte-filtre Filtres en fibres de verre, membrane en ester de cellulose (MCE), PVC, polycarbonate ou gélatine. | 2 | FD CEN/TR 15230, HSE MDHS 14/4, INSHT MTA/MA 014/A11 |
| Perspec | Inhalable Alvéolaire thoracique | | Filtre 50 mm - Des sélecteurs de forme particulière sont utilisés pour les différentes fractions | 2 | FD CEN/TR 15230, Kenny, Aitken, et al., 1997, Woehkenberg et al., 1998 |
| Respicon | Inhalable Thoracique Alvéolaire | | Filtre en fibres de verre 37 mm ou membranes PVC 37 mm (tailles de pores : 5,0 µm). | 3,11 | FD CEN/TR 15230, HSE MDHS 14/4, INSHT MTA/MA 014/A11 Brochure TSI |
| Impacteur Marble Impacteur Mini-Moudi | Inhalable Thoracique Alvéolaire | | Filtres de nature différente | 2 | HSE MDHS 14-4 |

³ Egalement noté PGP-FSP10 (FD CEN/TR 15230)

Évaluation des méthodes de mesure dans l'air des lieux de travail pour les poussières dites sans effet spécifique (PSES)

**Mission permanente VLEP
Saisine n°2017-SA-0148**

**RAPPORT
d'expertise collective**

Comité d'experts spécialisés « Valeurs sanitaires de référence »

Groupe de travail « Métrologie »

Juin 2020

Mots clés

Poussières sans effet spécifique (PSES), fraction inhalable, fraction alvéolaire, aérosols, air des lieux de travail, VLEP, valeurs limites, métrologie, méthodes de mesure, lieux de travail, milieu professionnel

Dust without specific effect (DWSE), inhalable fraction, respirable fraction, aerosols, workplace air, OEL, limit values, metrology, measurement methods, workplaces, occupational environment

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GRUPE DE TRAVAIL « METROLOGIE »

Président

M. Benoît OURY – Responsable d'études au laboratoire de chimie analytique organique de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) – Compétences : mise au point de méthode de mesure, chimie organique.

Membres

Mme Aline BOUCHAIN – Responsable technique et QSE (ATMO Franche Comté) – Compétences : Qualité de l'air ambiant, métrologie, incertitude (démission le 12/03/2019).

Mme Catherine HEDOJUN-LANGLET – Responsable du laboratoire de Toxicologie Industrielle (CRAMIF) – Compétences : qualité de l'air des lieux de travail, hygiène industrielle, mesure des polluants.

M. Horacio HERRERA – Chef de département (Institut universitaire romand de santé au travail) – Compétences : hygiène industrielle, surveillance des ambiances de travail (métrologie, chimie analytique).

Mme Nadine LOCOGE – Professeur à l'École des Mines de Douai – Compétences : qualité de l'air intérieur, chimie, métrologie des COV.

Mme Virginie MATERA – Responsable d'études au laboratoire de chimie analytique inorganique de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) – Compétences : qualité de l'air des lieux de travail, mise au point de méthode de mesure, chimie inorganique.

Mme Jessica QUERON – Ingénieur d'études et de recherche (institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)) – Compétences : qualité de l'air intérieur et de l'air des lieux de travail, métrologie des COV.

M. Olivier RAMALHO – Chef de projet multi-expositions au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et responsable métrologie à l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) – Compétences : qualité de l'air intérieur, métrologie, odeurs, chimie analytique.

Mme Caroline RIO – Responsable Laboratoire Interrégional de Chimie (LIC) – Compétences : qualité de l'air ambiant et de l'air intérieur, chimie physique, aérosol organique, métrologie.

M. Michel SLOIM – Retraité (anciennement Ingénieur chimiste au Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP)) – Compétences : qualité de l'air des lieux de travail, métrologie, chimie analytique.

Mme Sophie SOBANSKA – Chargée de recherche (Centre national de la recherche scientifique (CNRS)) – Compétences : Qualité de l'air, biochimie, particules, métaux.

M. Guénaél THIAULT – Chef de section (LCPP) – Compétences : qualité de l'air intérieur et de l'air des lieux de travail, métrologie, chimie.

M. Raymond VINCENT – retraité (anciennement Chargé de mission à la Direction Déléguée aux Applications (INRS)) - Compétences : qualité de l'air des lieux de travail, chimie, métrologie des polluants, évaluation des risques professionnels.

RAPPORTEURS

Mme Virginie MATERA – Responsable d'études au laboratoire de chimie analytique inorganique de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) – Compétences : qualité de l'air des lieux de travail, mise au point de méthode de mesure, chimie inorganique.

Mme Sophie SOBANSKA – Chargée de recherche (Centre national de la recherche scientifique (CNRS)) – Compétences : Qualité de l'air, biochimie, particules, métaux.

M. Raymond VINCENT – retraité (anciennement Chargé de mission à la Direction Déléguée aux Applications (INRS)) - Compétences : qualité de l'air des lieux de travail, chimie, métrologie des polluants, évaluation des risques professionnels.

COMITÉS D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par les CES suivants :

- CES « valeurs sanitaires de référence » (CES VSR) le 19 mars 2020

Président

M. Fabrice MICHIELS – Médecin du travail / toxicologue à l'Association Interentreprises pour la Santé au Travail 19 – Compétences : Médecine du travail, toxicologie

Vice-président

M. Raymond VINCENT - Retraité (anciennement Chargé de mission à la Direction Déléguée aux Applications (INRS)) - Compétences : chimie, métrologie des polluants, évaluation des risques professionnels

Membres

M. Marc BARIL – Professeur associé à l'Université de Montréal – Compétences : Chimiste toxicologue, hygiène industrielle

M. Stéphane BINET – Pharmacien toxicologue à la Direction des Études et Recherches à l'INRS – Compétences : toxicologie générale et industrielle

Mme Michèle BISSON – Responsable d'étude à l'INERIS – Compétences : Pharmacien toxicologue, toxicologie générale

Mme Anne CHEVALIER – Retraîtée de l'Institut de Veille Sanitaire - Compétences : épidémiologie

Mme Fatiha EL-GHISSASSI – Scientifique, Section des Monographies du CIRC (IMO). Centre International de Recherche sur le Cancer - Compétences : biochimie spécialiste en cancérogénèse et génotoxicité

M. Claude EMOND – Professeur adjoint de clinique à l'Université de Montréal – Compétences : Toxicologie, modèle PBPK, toxicocinétique, nanotoxicologie, perturbateurs endocriniens

M. Rex FITZGERALD – Expert en toxicologie réglementaire au Centre Suisse de Toxicologie Humaine Appliquée - Compétences : toxicologie de la reproduction, neurotoxicité du développement, évaluation des risques humains

M. Robert GARNIER – Médecin toxicologue, Centre antipoison de Paris - Compétences : Toxicologie médicale, médecine du travail

Mme Perrine HOET – Professeur à l'Université Catholique de Louvain. IREC – Compétences : médecine, toxicologie industrielle et environnementale

Mme Yuriko IWATSUBO – Médecin épidémiologiste à Santé publique France – Compétences : épidémiologie des risques professionnels

Mme Cécile KAIRO – Évaluateur de risques sanitaires à Santé publique France - Compétences : Docteur en pharmacie spécialisé en environnement, toxicologie générale et évaluation des risques

Mme Laila LAKHAL – Ingénieur INRA unité Toxalim - Compétences : Toxicologie, métabolisme, perturbateurs endocriniens

M. Frédéric LIRUSSI – Maître de Conférences des Universités– Praticien Hospitalier (MCU-PH) à l'UFR des Sciences de Santé & CHU de Dijon - Compétences : Toxicologie Clinique, Toxicologie analytique, Immunité Innée, Reprotoxicité

Mme Anne MAITRE – Professeur des Universités – Praticien Hospitalier (PU-PH) au Laboratoire de Toxicologie Professionnelle et Environnementale, CHU de Grenoble ; Responsable de l'équipe « Environnement et prédiction de la santé des populations », Laboratoire TIMC, Université Grenoble Alpes – Compétences : médecine, toxicologie, IBE, métrologie des polluants, hygiène industrielle

Mme Anne PLATEL – Maître de conférences à la Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques de Lille – Laboratoire de Toxicologie Génétique, Institut Pasteur de Lille - Compétences : Toxicologie, Génotoxicité, QSAR

M. Henri SCHROEDER – Professeur associé à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Lorraine– Laboratoire CALBINOTOX, EA 7488 - Pharmacien neurobiologiste - Compétences : Neurotoxicité, polluants environne taux, comportement animal, développement cérébral, exposition périnatale

M. Olivier SORG – Chef de groupe de recherche à l'Université de Genève - Compétences : Docteur es science en biochimie, toxicologie expérimentale, dermatotoxicologie

M. Jérôme THIREAU – Chargé de recherche au CNRS - Compétences : Docteur es science, physiologie animale, biologie cellulaire, cardiotoxicité

M. Claude VIAU – Professeur titulaire retraité, actuellement Professeur associé du Département de santé environnemental et santé au travail, École de santé publique à l'université de Montréal – Compétences : Toxicologie, Indicateurs Biologiques d'Exposition, hygiène industrielle, métrologie des polluants

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Marion KEIRSBULCK - Chef de projet – anses

Mme Amandine PAILLAT – Chef de projet – anses

Contribution scientifique

Mme Marion KEIRSBULCK - Chef de projet – anses

Mme Amandine PAILLAT – Chef de projet – anses

Secrétariat administratif

Mme Sophie SADDOKI – assistante - anses

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| Présentation des intervenants | 3 |
| SOMMAIRE | 6 |
| Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions | 12 |
| Sigles et abréviations | 30 |
| Liste des tableaux | 31 |
| Liste des figures | 31 |
| | |
| 1 Introduction | 33 |
| 1.1 Contexte..... | 33 |
| 1.2 Objet de la saisine..... | 34 |
| 1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre (Anses, CES, GT, rapporteur(s)) et organisation..... | 34 |
| 1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts. | 34 |
| | |
| 2 Informations générales | 35 |
| 2.1 Fractions granulométriques | 35 |
| 2.2 Réglementation | 36 |
| | |
| 3 Valeurs de référence | 37 |
| 3.1 VLEP françaises | 37 |
| 3.2 VLEP établies par le CES VSR..... | 37 |
| | |
| 4 Méthodes de mesure dans l'air des lieux de travail et dans l'air intérieur | 38 |
| 4.1 Recensement des méthodes de mesure | 39 |
| 4.2 Remarques préalables sur l'évaluation des dispositifs de prélèvement..... | 41 |
| 4.3 Remarques préalables sur la gravimétrie..... | 43 |
| 4.3.1 Remarques préalables et recommandations | 43 |
| 4.3.2 Recueil des limites de détection et de quantification des supports | 45 |
| 4.4 Évaluation détaillée des méthodes de mesure de la fraction inhalable des PSES dans l'air des lieux de travail | 48 |
| 4.4.1 Efficacité d'échantillonnage des échantillonneurs individuels de la fraction inhalable | 48 |
| 4.4.1.1 Description et performance du dispositif CIP 10-I vis-à-vis de la convention inhalable..... | 49 |
| 4.4.1.2 Description et performance du dispositif IOM vis-à-vis de la convention inhalable | 50 |
| 4.4.1.3 Description et performance du dispositif GSP ou CIS vis-à-vis de la convention inhalable..... | 51 |
| 4.4.1.4 Description et performance du dispositif Cassette fermée 37 mm CFC vis-à-vis de la convention inhalable | 52 |
| 4.4.1.5 Description et performance du dispositif CFC 37mm et capsule interne vis-à-vis de la convention inhalable | 54 |
| 4.4.1.6 Description et performance du dispositif Flying Saucer 37 mm vis-à-vis de la convention inhalable | 54 |
| 4.4.1.7 Description et performance du dispositif Button vis-à-vis de la convention inhalable..... | 54 |
| 4.4.1.8 Description et performance du dispositif Seven-Hole (7-Hole) vis-à-vis de la convention inhalable..... | 55 |
| 4.4.1.9 Description et performance du dispositif PAS-6 | 56 |
| 4.4.1.10 Synthèse des performances des dispositifs vis-à-vis de la convention inhalable | 57 |
| 4.4.1.11 Précision/répétabilité des dispositifs : | 60 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 4.4.1.12 | Etudes de comparaison des dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable sur le terrain | 60 |
| 4.4.1.13 | Conclusions sur l'efficacité des dispositifs d'échantillonnage de la fraction inhalable | 61 |
| 4.4.2 | Évaluation des dispositifs au regard de la VLEP-8h inhalable établie par le CES : Évaluation de la gravimétrie | 64 |
| 4.5 | Évaluation détaillée des méthodes de mesure de la fraction alvéolaire des PSES dans l'air des lieux de travail..... | 66 |
| 4.5.1 | Efficacité d'échantillonnage des échantillonneurs individuels de la fraction alvéolaire | 66 |
| 4.5.1.1 | Description et performances des dispositifs utilisant des cyclones | 67 |
| 4.5.1.2 | Description et performances du dispositif utilisant une coupelle rotative (CIP10-R)..... | 73 |
| 4.5.1.3 | Synthèse des performances des dispositifs de prélèvement vis-à-vis de la fraction conventionnelle alvéolaire..... | 74 |
| 4.5.1.4 | Comparaison de dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire | 76 |
| 4.5.1.5 | Conclusions sur l'efficacité des dispositifs d'échantillonnage de la fraction alvéolaire | 77 |
| 4.5.2 | Évaluation des dispositifs au regard de la VLEP-8h alvéolaire établie par le CES : Evaluation de la gravimétrie | 81 |
| 4.6 | Évaluation détaillée des méthodes de mesure simultanée de la fraction alvéolaire et inhalable dans l'air des lieux de travail | 83 |
| 4.6.1.1 | Description et performances du dispositif utilisant un impacteur en cascade..... | 83 |
| 4.6.1.2 | Description et performances du dispositif IOM Dual fraction..... | 86 |
| 4.6.1.3 | Comparaison de dispositifs | 86 |
| 4.6.1.4 | Conclusions sur l'efficacité des dispositifs d'échantillonnage simultané des fractions inhalable et alvéolaire..... | 87 |
| 4.7 | Présentation des principales caractéristiques des méthodes applicables pour l'air intérieur..... | 88 |
| 5 | Conclusions et recommandations du CES..... | 89 |
| 6 | Bibliographie..... | 96 |
| 6.1 | Protocoles et méthodes de mesure | 96 |
| 6.2 | Publications..... | 98 |
| ANNEXES | 103 | |
| Annexe 1: Support technique : présentation détaillée des dispositifs de prélèvement individuel de la fraction inhalable et alvéolaire dans l'air des lieux de travail..... | 104 | |
| Annexe 2 : Données issues de la littérature relatives aux dispositifs de prélèvements de la fraction inhalable..... | 111 | |
| Annexe 2.1 : Descriptif des études identifiées de comparaison des dispositifs de prélèvement à la fraction conventionnelle inhalable ou de comparaison entre différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable | 111 | |
| Annexe 2.2 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement de l'IOM à la convention inhalable | 127 | |
| Annexe 2.3 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement de la CFC avec convention inhalable | 133 | |
| Annexe 2.4 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement de la CFC avec capsule interne..... | 138 | |
| Annexe 2.5 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du CIP-10 avec convention inhalable | 139 | |
| Annexe 2.6 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du GSP (CIS) avec la convention inhalable | 141 | |
| Annexe 2.7 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du Button avec la convention inhalable | 146 | |
| Annexe 2.8 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du 7-hole avec la convention inhalable..... | 150 | |
| Annexe 2.9 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du PAS 6 avec la convention inhalable | 153 | |
| Annexe 2.10 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du Perspec avec la convention inhalable | 154 | |
| Annexe 2.11 : Autres études comparant les mesures réalisées avec différents dispositifs de la fraction inhalable..... | 155 | |
| Annexe 2.12 : Illustration des différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable | 162 | |

Annexe 3 : Données issues de la littérature relatives aux dispositifs de prélèvement individuel de la fraction alvéolaire163

| | |
|---|-----|
| Annexe 3.1 : Descriptif des études identifiées de comparaison des dispositifs de prélèvement à la fraction conventionnelle alvéolaire ou de comparaison entre différents dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire | 163 |
| Référence | 163 |
| Type d'étude..... | 163 |
| Dispositifs testés ^a | 163 |
| Objectifs et conditions de l'étude | 163 |
| Liden & Kenny (1993) | 163 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 163 |
| MRE 113A..... | 163 |
| Cyclone HD : 1,9 et 2,1 L.min ⁻¹ | 163 |
| Kenny & Gussman (1997)..... | 163 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 163 |
| GK 3.45 (cyclone GK) | 163 |
| GK 2.69 : 4,2 L.min ⁻¹ | 163 |
| Gautam <i>et al.</i> , 1997 | 163 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 163 |
| Multi inlet cyclone (cyclone GS)..... | 163 |
| Orientation du dispositif : 0,90 et 180 ° | 163 |
| Courbon <i>et al.</i> , 1988 | 163 |
| Comparaison fraction conventionnelle ancienne ACGIH et BMRC | 163 |
| CIP-10 R..... | 163 |
| Génération de 2 types d'aérosol coal dust $\rho = 1,45 \text{ g.cm}^{-3}$. Caractérisation par K7 ouverte ; aluminium oxide $\rho * 3,96 \text{ g.cm}^{-3}$ | 164 |
| NIOSH 0600 (1998)..... | 164 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 164 |
| Al cyclone | 164 |
| Cyclone Al : 2,5 L.min ⁻¹ | 164 |
| Chen <i>et al.</i> , 1999 | 164 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 164 |
| Big Body cyclone | 164 |
| Tests dans différentes conditions d'humidité relative : 10 à 80%..... | 164 |
| Tsai <i>et al</i> (1999)..... | 164 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 164 |
| 18 mm Al cyclone..... | 164 |
| • Débit testé : 1,7 L.min ⁻¹ | 164 |
| Görner <i>et al.</i> , 2001 | 164 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 164 |
| Cyclone personal sampler South Afr..... | 165 |
| CIP=10R : 10 L.min ⁻¹ | 165 |
| Lee <i>et al</i> (2010) | 165 |
| Comparaison entre différents dispositifs : CIP10 vs cyclone DO ou HD | 165 |
| FSP10 (Cyclone HD) | 165 |
| GK2.69 : 4,2 L.min ⁻¹ | 165 |
| HSL (2011)..... | 165 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 165 |
| GK 4.162 (cyclone GK) | 165 |

| | |
|--|-----|
| Débit testé : 7 à 10 L.min ⁻¹ | 165 |
| Verpaele <i>et al.</i> (2013)..... | 165 |
| Comparaison entre 6 dispositifs cyclones et CIP 10 | 165 |
| CIP-10 R..... | 166 |
| Comparaison des masses prélevées par les différents dispositifs + Comparaison de la masse prélevée par chaque dispositif avec la concentration médiane issue des différentes mesures sur le site. | 166 |
| Hu <i>et al.</i> (2014)..... | 166 |
| FSP 10 (cyclone HD) | 166 |
| FSP 10(cyclone HD) : 10 L.min ⁻¹ | 166 |
| Soo <i>et al.</i> (2014) | 166 |
| Comparaison entre 4 dispositifs cyclones : 10 mm DO, SKC AI,BGI4L et GK2.69 | 166 |
| Tests avec des cassettes 37 mm et 25 mm en polystyrène (P) ou polypropylène (SD : static-dissipative)..... | 166 |
| Cyclone AI : 2,5 L.min ⁻¹ | 166 |
| Stacey <i>et al.</i> (2014) | 166 |
| Comparaison de différents dispositifs : cyclone GK, cyclone HDet CIP10vs SIMPEDS | 166 |
| CIP-10R..... | 166 |
| CIP-10R : 10 L.min ⁻¹ | 166 |
| Stacey <i>et al.</i> (2016) | 166 |
| Comparaison de différents dispositifs : cyclone GK, cyclone HD et PPI8vs SIMPEDS | 166 |
| PPI 8 (impacteur)..... | 166 |
| 0°, 180° et en rotation..... | 167 |
| Lee <i>et al.</i> (2016)..... | 167 |
| GK2,68 / 10 mm DO | 167 |
| CIP 10 R..... | 167 |
| GK2.69 : 4,4 L.min ⁻¹ | 167 |
| Metropol CIP10 (2017) | 167 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 167 |
| CIP 10-R..... | 167 |
| CIP-10R : 10 L.min ⁻¹ | 167 |
| SKC Plastic cyclone notice (2018)..... | 167 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 167 |
| Cyclone SKC plastique (cyclone HD)..... | 167 |
| Cyclone HD : 3 L.min ⁻¹ | 167 |
| Metropol Cyclone (2019) | 167 |
| Comparaison fraction conventionnelle | 167 |
| Cyclone GK 4.162 (cyclone GK) | 167 |
| Cyclone GK 4.162 : 8,5 et 3 L.min ⁻¹ (respectivement fraction alvéolaire et thoracique) | 168 |
| ^a les dispositifs de prélèvement notés en gras correspondent à des dispositifs de prélèvement individuels et commercialisés (les autres dispositifs permettent de réaliser des mesures à poste fixe ou bien sont particuliers et non commercialisés). | 168 |
| Annexe 3.2 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des cyclones Dorr Oliver (DO) avec la convention alvéolaire | 169 |
| Annexe 3.3 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des cyclones AI avec la convention alvéolaire | 173 |
| Annexe 3.4 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des cyclones GS avec la convention alvéolaire | 175 |
| Annexe 3.5 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des cyclones Higgins Dewell (HD) avec la convention alvéolaire | 177 |
| Annexe 3.6 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des cyclones GK avec la convention alvéolaire | 179 |
| Annexe 3.7 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du CIP 10-R avec la convention alvéolaire..... | 182 |

| | |
|--|------------|
| Annexe 3.8 : Autres études comparant les mesures réalisées avec différents dispositifs de la fraction alvéolaire..... | 184 |
| Annexe 3.9 : Illustration des différents dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire | 189 |
| Annexe 4 : Données issues de la littérature relatives aux dispositifs de prélèvement simultané individuel des fractions inhalable et alvéolaire | 190 |
| Annexe 4.1 : Descriptif des études identifiées de comparaison entre différents dispositifs de prélèvement simultané des fractions inhalable et alvéolaire | 190 |
| Référence | 190 |
| Type d'étude..... | 190 |
| Dispositifs testés ^a | 190 |
| Objectifs et conditions de l'étude | 190 |
| Kenny <i>et al.</i> (2001) | 190 |
| Comparaison entre différents dispositifs : IOM dual fraction et personal cyclones..... | 190 |
| Dual fraction dust sampler (IOM Multidust) | 190 |
| cyclones (MDHS 14/2) : 2,2 L.min ⁻¹ | 190 |
| Tatum <i>et al.</i> (2002) | 190 |
| Comparaison entre différents dispositifs : Respicon vs BGI-4 cyclone..... | 190 |
| Respicon (Impacteur)..... | 190 |
| BGI-4 (cyclone HD) : 2,2 L.min ⁻¹ | 190 |
| Singh <i>et al.</i> (2003)..... | 190 |
| Comparaison des dispositifs PCIS et MOUDI | 190 |
| PCIS - miniaturized impactor at 4 stages (Impacteur)..... | 190 |
| MOUDI (impacteur) : 30 L.min ⁻¹ | 190 |
| Teikari <i>et al.</i> (2003)..... | 190 |
| Comparaison de 3 dispositifs avec modified IOM sampler | 190 |
| Modified IOM foam sampler..... | 190 |
| Débit du fabricant testé sans plus de précision | 190 |
| Soutien de l'association "American forest and paper association" | 190 |
| Comparaison entre différents dispositifs : Respicon vs SKC AI cyclone | 190 |
| Respicon (Impacteur)..... | 190 |
| SKC AI cyclone (AI cyclone) : 2,5 L.min ⁻¹ | 191 |
| Wu & Vincent (2007)..... | 191 |
| Comparaison entre différents dispositifs : Modified marple impactor et IOM dual fraction | 191 |
| IOM Dual fraction..... | 191 |
| Génération de 6 types d'aérosol à partir de poudre (fused alumina) | 191 |
| Linnainmaa <i>et al.</i> (2008)..... | 191 |
| Comparaison de 3 dispositifs avec modified IOM sampler | 191 |
| Modified IOM foam sampler..... | 191 |
| Two-stage cascade impactor PM10/4 (impacteur) : 10 L.min ⁻¹ | 191 |
| ^a les dispositifs de prélèvement notés en gras correspondent à des dispositifs de prélèvement individuels et commercialisés (les autres dispositifs permettent de réaliser des mesures à poste fixe ou bien sont particuliers et non commercialisés). 191 | |
| Annexe 4.2 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement de l'IOM Dual Fraction avec les conventions inhalable et alvéolaire | 192 |
| Annexe 4.3 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du CIS multi-fraction respirable avec les conventions inhalable et alvéolaire..... | 192 |
| Annexe 4.4 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des impacteurs avec les conventions inhalable et alvéolaire..... | 192 |
| Annexe 4.5 : Autres études comparant les mesures réalisées avec différents dispositifs d'échantillonnage simultané des fractions inhalable et alvéolaire | 193 |

| | |
|--|------------|
| Annexe 4.6 : Illustration des différents dispositifs de prélèvement simultané des fractions inhalable et alvéolaire..... | 195 |
| Annexe 5 : Consultation publique | 196 |
| Annexe 6 : Suivi des actualisations du rapport..... | 197 |

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions

relative à l'expertise en vue de la fixation de valeurs limites d'exposition à des agents chimiques en milieu professionnel

portant sur l'évaluation des méthodes de mesure pour les poussières dites sans effet spécifique (PSES)

Ce document synthétise les travaux du comité d'expert spécialisé « valeurs sanitaires de référence » (CES VSR) et du groupe de travail « Métrologie ».

Présentation de la question posée

L'Anses a été saisie le 18 novembre 2015 par la direction générale du travail (DGT) afin de mener les travaux d'expertise nécessaires à la révision des valeurs limites d'exposition professionnelle pour les poussières dites sans effet spécifique (PSES), c'est-à-dire « qui ne sont pas en mesure de provoquer seules sur les poumons ou sur tout autre organe ou système du corps humain d'autre effet qu'un effet de surcharge » (circulaire DGT du 9 mai 1985).

La France dispose actuellement de valeurs réglementaires contraignantes pour les PSES (article R.4222-10 du code du travail) : une valeur moyenne d'exposition sur 8h en poussières totales de 10 mg.m⁻³ et une valeur moyenne d'exposition sur 8h pour les poussières alvéolaires de 5 mg.m⁻³.

La DGT a demandé à l'Anses de réévaluer prioritairement ces valeurs, suite à la publication de l'avis de l'Anses relatif à la pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et des risques associés chez les travailleurs.

Cette demande ayant été qualifiée de prioritaire, la démarche suivie pour recommander de nouvelles valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) s'est appuyée sur une analyse critique des rapports et expertises scientifiques internationaux déjà existants et non sur une analyse de toute la littérature scientifique existante selon la méthodologie habituellement mise en œuvre.

L'Anses a publié en novembre 2019 un avis et un rapport d'expertise concernant uniquement les effets sanitaires liés à une exposition aux PSES et a recommandé à partir des expertises scientifiques existantes les valeurs limites d'exposition professionnelle suivantes :

- VLEP-8h pour la fraction inhalable : 4 mg.m⁻³
- VLEP-8h pour la fraction alvéolaire : 0,9 mg.m⁻³

Le présent document constitue une réponse à la partie relative à l'évaluation des méthodes de mesures des PSES au regard de ces recommandations et constitue un complément à la partie publiée en novembre 2019 recommandant des VLEP sur la base d'une analyse critique des rapports et expertises scientifiques internationaux déjà existants.

Contexte scientifique

Le dispositif français d'établissement des VLEP comporte trois phases clairement distinctes :

- une phase d'expertise scientifique indépendante (seule phase confiée à l'agence) ;

- une phase d'établissement d'un projet réglementaire de valeur limite contraignante ou indicative par le ministère chargé du travail ;
- une phase de concertation sociale lors de la présentation du projet réglementaire au sein du Conseil d'Orientation sur les Conditions de Travail (COCT). L'objectif de cette phase étant de discuter de l'effectivité des valeurs limites et de déterminer d'éventuels délais d'application, en fonction de problèmes de faisabilité technico-économique.

L'organisation de la phase d'expertise scientifique nécessaire à la fixation des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) a été confiée à l'Afsset dans le cadre du plan santé au travail 2005-2009 (PST), puis à l'Anses suite à la fusion de l'Afsset et de l'Afssa en 2010.

Le CES évalue également les méthodes de référence applicables pour la mesure des niveaux d'exposition sur le lieu de travail. La qualité de ces méthodes et leur applicabilité à la mesure des expositions aux fins de comparaison aux VLEP recommandées par l'Anses sont évaluées notamment sur leur conformité aux exigences de performance de la NF-EN 482 et de leur niveau de validation.

Organisation de l'expertise

L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé (CES) « valeurs sanitaires de référence » (CES « VSR ») et au GT « Métrologie » l'instruction de cette saisine. Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques.

Le rapport produit tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

Description de la méthode

Pour la partie relative à l'évaluation des méthodes de mesure:

Un rapport d'évaluation des méthodes de mesure a été élaboré par le GT « métrologie » et soumis au CES VSR qui l'a commenté et validé. Plusieurs agents de l'Anses ont également contribué à ces travaux.

Les différents protocoles de mesure des PSES dans l'air des lieux de travail ont été recensés et regroupés en fonction des méthodes mises en œuvre. Ces dernières ont ensuite été évaluées et classées au regard des exigences de performances indiquées notamment dans la norme NF EN 482 : « Atmosphère des lieux de travail – Exigences générales concernant les performances des modes opératoires de mesurage des agents chimiques » et des critères de décision détaillés dans le rapport « méthodologie d'évaluation des méthodes de mesure dans l'air des lieux de travail et l'air intérieur » (Anses, 2020). La liste des principales sources consultées est précisée dans le rapport méthodologique (Anses, 2020). Le classement de ces méthodes est réalisé de la manière suivante :

- catégorie 1A : méthodes reconnues et validées (l'ensemble des critères de performance sont satisfaits) ;

- catégorie 1B : méthodes partiellement validées (les critères essentiels de performance de sont satisfaits) ;
- catégorie 2 : méthodes indicatives (des critères essentiels de validation ne sont pas suffisamment explicités, ou bien la méthode nécessite des ajustements devant faire l'objet d'une validation) ;
- catégorie 3 : méthodes non recommandées (des critères essentiels de validation sont absents ou inappropriés). Cette catégorie englobe les méthodes inadaptées pour lesquelles des critères essentiels de validation ne sont pas remplis et les méthodes non évaluables (désignées par la catégorie 3*) pour lesquels des critères essentiels de validation ne sont pas documentés.

Une étude comparative et détaillée des méthodes classées en catégorie 1A, 1B et 2 est réalisée au regard des différentes données de validation et de la faisabilité technique, de manière à recommander la ou les méthodes les plus appropriées pour la mesure des concentrations aux fins de comparaison aux VLEP.

Concernant la mesure de la concentration en PSES, certains critères d'évaluation ne s'appliquent pas : détermination du débit d'échantillonnage pour les supports passifs, interférences, rendement d'adsorption/désorption. Les critères essentiels à considérer portent sur la conformité des dispositifs de prélèvement à la fraction conventionnelle inhalable ou alvéolaire, l'influence des conditions environnementales, la capacité de piégeage, les limites de quantification, l'étendue de mesure et les incertitudes.

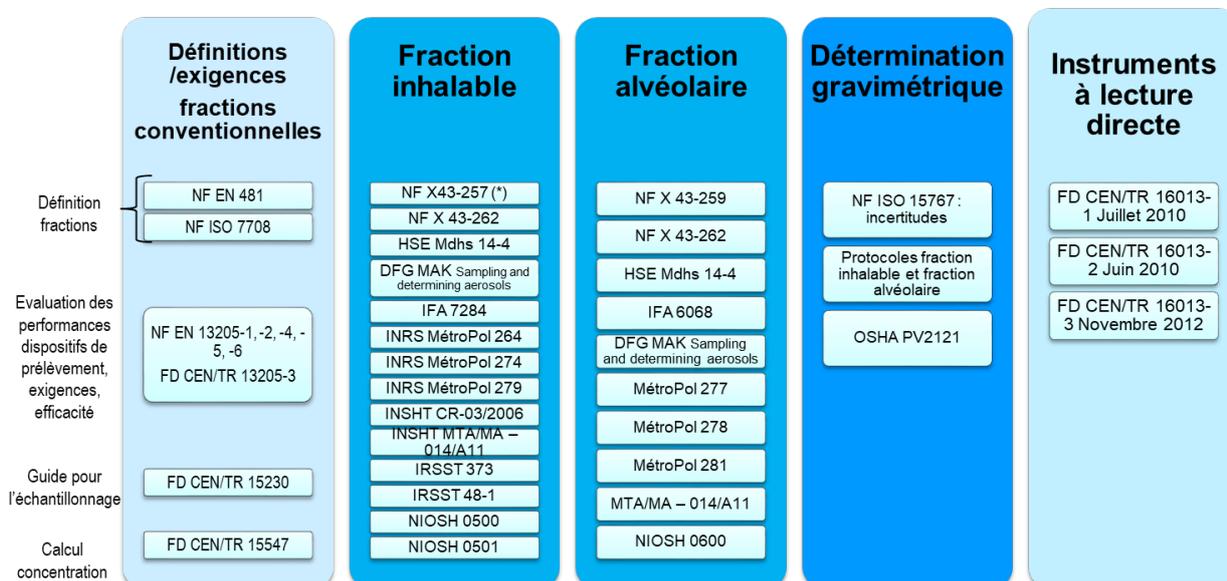
C'est pourquoi, une analyse des performances des dispositifs de prélèvements, décrits dans les protocoles recensés, au regard des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire a été réalisée dans un premier temps. Une revue de la littérature a également été réalisée afin de compléter ces données (requêtes effectuées sur la base Scopus, en décembre 2017 et mars 2018, mots clés : « aerosol, sampler, inhalable, respirable, occupational, internal, capsule, accu-cap », sans restriction de date). L'évaluation des performances des dispositifs de prélèvement vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable ou alvéolaire a été réalisée à partir de l'ensemble de ces données (protocoles + littérature) en s'attachant à évaluer et analyser le biais de chaque préleveur vis-à-vis de la courbe conventionnelle. Les limites de quantification, la capacité de piégeage et l'étendue de mesure ont ensuite été évaluées au travers des performances liées à la gravimétrie.

Le rapport ainsi que la synthèse et les conclusions de l'expertise collective ont été adoptées par le CES « valeurs sanitaires de référence » le 19 mars 2020.

Ce rapport et les conclusions ont fait l'objet d'une consultation publique du 07/05/2020 au 05/06/2020. Aucun commentaire n'a été reçu lors de la consultation. Le CES VSR a adopté cette version finalisée le 26 juin 2020.

Résultat de l'expertise collective concernant l'évaluation des méthodes de mesure des PSES en lien avec les VLEP-8h recommandées par l'Anses

La Figure 1 présente la typologie des protocoles recensés en lien avec la mesure de la concentration en PSES (fraction inhalable et fraction alvéolaire).



(*) La norme NF X 43-257 ne décrit pas le prélèvement de la fraction inhalable, mais le prélèvement d'aérosols à l'aide d'une cassette d'orifice 4 mm. Toutefois la méthode décrite dans cette norme est utilisée dans de nombreux pays pour la détermination de la fraction inhalable des aérosols.

Figure 1 : Recensement des protocoles

Les méthodes recensées mettent en œuvre un prélèvement d'air à l'aide d'un dispositif de prélèvement de la fraction inhalable ou bien de la fraction alvéolaire sur différents types de support. Il existe également des dispositifs d'échantillonnage simultané de la fraction inhalable et alvéolaire. Le support de collecte fait ensuite l'objet d'une analyse gravimétrique. Ces méthodes diffèrent donc essentiellement par le dispositif de prélèvement utilisé. Le Tableau 1 présente les différentes méthodes de mesure des PSES recensées ainsi que les dispositifs de prélèvement des poussières mentionnés dans les protocoles recensés :

- dispositifs de prélèvements de la fraction inhalable : Button, cassette fermée 37 mm (CFC), CFC + capsule interne, CIP 10-I, Flying saucer 37mm, GSP 3,5 ou CIS, GSP-10, IOM, PAS-6, 7-hole ;
- dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire : Cyclone Dorr-Oliver (cyclone DO), Cyclone Higgins-Dewell (cyclone HD), Cyclone GS1/GS3, Cyclone GK2.69, Cyclone GK 4.162, Cyclone AI, CIP 10-R, échantillonneurs haut débit (PGP10 , cyclone BGI GK4.162, impacteur PPI8) ;
- dispositifs de prélèvement permettant un échantillonnage simultané des deux fractions inhalable et alvéolaires : CIS multi-fraction respirable, IOM 'multidust' ou Dual fraction respirable, Perspec, Respicon, Impacteur Marple et Impacteur Mini-Moudi.

Les dispositifs de prélèvements de la fraction inhalable ou alvéolaire à poste fixe n'ont pas été évalués car ils ne permettent pas d'évaluer les expositions professionnelles. Les dispositifs de mesure des PSES à lecture directe (photométrie, comptage optique de particules) n'ont également pas été évalués car, bien que permettant un suivi quasi instantané des concentrations ainsi qu'un suivi des distributions granulométriques, ils présentent à ce jour des limitations qui ne permettent

pas de les utiliser pour le contrôle du respect d'une VLEP réglementaire, notamment la nécessité de calculs complémentaires pour estimer l'exposition moyenne pour comparaison avec une VLEP.

Tableau 1 : Détail des méthodes de mesure des PSES

| Dispositif de prélèvement | Fraction d'intérêt | Support de prélèvement | Débit de prélèvement (L.min ⁻¹) | Protocoles |
|-----------------------------|---------------------------------------|---|---|--|
| Button | Inhalable | Membrane PVC ou en ester de cellulose (EC) diamètre 25mm | 4 | FD CEN/TR 15230, HSE MDHS 14-4, INHST CR 003 A06, INSHT MTA/MA 014/A11 |
| Cassette fermée 37 mm (CFC) | Inhalable Fraction totale (US-Canada) | Membrane PVC 37 mm, filtres en fibres de verre ou fibres de quartz, membrane en ester de cellulose (MCE), téflon | 1 à 2 | INRS MétroPol M-274 + INRS MétroPol cassette fermée, NIOSH 0500, IRSST 48-1, NF X43-257 |
| CFC et capsule interne | Inhalable | Membrane PVC 37mm (2 à 5µm), soudée à une capsule en PVC Capsule soudée à une membrane en EC | 1 à 2 | NIOSH 0501, INRS MétroPol M-274, INRS MétroPol cassette, NF X43-257 |
| CIP 10-I V.1 ou V.2 | Inhalable | Mousse polyuréthane | 10 | INRS MétroPol M-279, INRS MétroPol M-281, INRS MétroPol CIP 10, FD CEN/TR 15230, INHST CR-03/2006, INSHT MTA/MA 014/A11 |
| Flying Saucer 37 mm | Inhalable | Membrane PVC 37 mm | 2 | OSHA PV 2121 |
| GSP-3,5 ¹ ou CIS | Inhalable | Filtre en fibres de verre 37 mm | 3,5 | HSE MDHS 14/4, INHST CR-03/2006, INSHT MTA/MA 014/A11, FD CEN/TR 15230, BIA 7284, DFG MAK sampling aerosols |
| GSP-10 ² | inhalable | Filtre en fibres de verre 37 mm | 10 | INSHT MTA/MA 014/A11, BIA 7284, FD CEN/TR 15230 |
| IOM | Inhalable | Filtre diamètre 25 mm + porte filtre (en plastique conducteur ou en acier inoxydable). Filtres en fibres de verre, membrane en ester de cellulose (MCE), PVC, polycarbonate ou gélatine. | 2 | HSE MDHS 14/4, FD CEN/TR 15230, INHST CR-03/2006, INSHT MTA/MA 014/A11 IRSST MA-373 |
| PAS-6 | Inhalable | Filtre de 25 mm | 2 | FD CEN/TR 15230, INHST CR 003 A06, INSHT MTA/MA 014/A11 |
| 7-hole (ou multi-orifice) | Inhalable | Filtre de 25 mm | 2 | HSE MDHS 14/4 |
| Cyclone DO | Alvéolaire | Membrane PVC 37 mm (5µm), filtres en fibres de verre ou fibres de quartz 37m | 1,7 | MétroPol 278, INSHT MTA-MA 014-A11, OSHA PV2121, NIOSH 0600, FD CEN/TR 15230 Lidén & Kenny (1993), Görner et al., 2001, Gautam et al., 1997 |
| | | | Optimisé : 1,5 | |
| Cyclones Higgins-Dewell | FSP 10 Alvéolaire | Membrane EC 37mm (8µm), Membrane PVC 37 mm (5µm), Filtres en fibres de verre 37mm ou 25 mm | 10 | DFG MAK, IFA 6065 |
| | | | Optimisé : 11,2 | Lee et al. (2010) |

¹ Parfois également noté PGP-GSP (FD CEN/TR 15230)

² Egalement noté PGP-GSP10 (FD CEN/TR 15230)

| Dispositif de prélèvement | | Fraction d'intérêt | Support de prélèvement | Débit de prélèvement (L.min ⁻¹) | Protocoles |
|--|---------------------------------------|--------------------|--|---|--|
| | SIMPEDS – FSP2 | | | 2,2 | NIOSH 0600, HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230, INSHT MTA-MA 014-A11 |
| | SKC Plastic | | | 3 | SKC Plastic cyclone notice (2019) |
| Cyclone GS1 | Alvéolaire | Alvéolaire | Membrane EC 37mm (8µm), Membrane PVC 37 mm (5µm), Filtres en fibres de verre 37mm ou 25 mm | 2 | HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230, INSHT MTA-MA 014-A11 |
| Cyclone GS3 | | | | 2,75 Optimisé : 2,5-2,6 | HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230, INSHT MTA-MA 014-A11 |
| Cyclone GK2.69 | Alvéolaire | Alvéolaire | Membrane EC 37mm (8µm), Membrane PVC 37 mm (5µm), Filtres en fibres de verre 37mm | 4,2 | HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230, INSHT MTA-MA 014-A11 |
| | | | | Optimisé : 4,4 | Kenny & Gussman (1997), Lee et al. (2010) |
| GK 4.162 | Alvéolaire | | | 9 | Thorpe (2011) |
| Cyclone AI | Alvéolaire | | Membrane PVC 37 mm (5µm), Filtre en fibres de verre 25 mm | 2,5 2,67 | NIOSH 0600, HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230 Chen et al. (1999) |
| CIP 10-R | Alvéolaire | | Mousse polyuréthane | 10 | Metropol 281 + Fiche MétroPol CIP 10, FD CEN/TR 15230, DFG MAK |
| Échantillonneurs haut débit (PGP10 ³ , cyclone BGI GK4.162, impacteur PPI8) | | Alvéolaire | Filtre PVC 37-mm (5.0-µm) | 8 à 10 | HSE MDHS 14-4, FD CEN/TR 15230 |
| CIS multi-fraction respirable | Inhalable Thoracique Alvéolaire | | Filtre en fibres de verre 37 mm + mousses polyuréthane | 3,5 | HSE MDHS 14/4 |
| IOM 'multidust' ou Dual fraction respirable | Inhalable Alvéolaire | | Mousse polyuréthane et filtre de 25 mm dans le porte-filtre Filtres en fibres de verre, membrane en ester de cellulose (MCE), PVC, polycarbonate ou gélatine. | 2 | FD CEN/TR 15230, HSE MDHS 14/4, INSHT MTA/MA 014/A11 |
| Perspec | Inhalable Alvéolaire thoracique | | Filtre 50 mm - Des sélecteurs de forme particulière sont utilisés pour les différentes fractions | 2 | FD CEN/TR 15230, Kenny, Aitken, et al., 1997, Woehkenberg et al., 1998 |
| Respicon | Inhalable Thoracique Alvéolaire | | Filtre en fibres de verre 37 mm ou membranes PVC 37 mm (tailles de pores : 5,0 µm). | 3,11 | FD CEN/TR 15230, HSE MDHS 14/4, INSHT MTA/MA 014/A11 Brochure TSI |
| Impacteur Marple Impacteur Mini-Moudi | Inhalable Thoracique Alvéolaire | | Filtres de nature différente | 2 | HSE MDHS 14-4 |

³ Egalement noté PGP-FSP10 (FD CEN/TR 15230)

Remarques préalables :

Concernant l'évaluation de l'efficacité d'échantillonnage au regard des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire :

- l'ensemble des informations nécessaires ne sont pas disponibles dans les protocoles ou la littérature. Le biais global sur l'ensemble de la plage granulométrique d'intérêt n'est pas souvent renseigné ; par contre, il a été possible de calculer, pour certains dispositifs de prélèvement, des biais pour différentes classes granulométriques ;
- **pour évaluer les données disponibles, une analyse qualitative du biais a donc été réalisée en considérant une valeur arbitraire $\pm 25\%$ pour juger les écarts à la courbe conventionnelle et classer les dispositifs de prélèvement sur la base d'études expérimentales en laboratoire ;**
- l'influence de certains paramètres sur l'efficacité d'échantillonnage (vitesses d'air, notamment vitesses d'air faibles fréquemment rencontrées dans l'air des lieux de travail ($v < 0,5 \text{ m.s}^{-1}$), charge électrique de l'aérosol, dépôt sur les parois, orientation du dispositif) a par ailleurs été discutée tandis que l'influence d'autres paramètres (composition de l'aérosol, variabilité inter spécimens, traitement de surface, etc.) n'a pas été évaluée en raison d'un manque de données ;
- la fraction conventionnelle inhalable a été déterminée pour des vitesses d'air relativement élevées (jusqu'à 4 m.s^{-1}). Les vitesses d'air actuellement rencontrées sur les lieux de travail en intérieur étant nettement inférieures (généralement inférieures à $0,3 \text{ m.s}^{-1}$; Baldwin *et al.*, 1998), plusieurs auteurs se sont attachés à définir une inhalabilité en air calme (Aitken *et al.*, 1999, Sleeth *et al.*, 2011). Toutefois, celle-ci n'a pas fait l'objet d'une convention et n'est actuellement pas normalisée. De ce fait, les différents dispositifs de prélèvement n'ont été évalués qu'au regard de la fraction inhalable conventionnelle, et ce quelle que soit la vitesse d'air à laquelle ils ont été testés.

Concernant l'évaluation de la gravimétrie :

- les supports les plus couramment rencontrés en prélèvement de l'air des lieux de travail et associés aux dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable et alvéolaire recensés sont : les filtres en fibres de quartz ou en fibres de verre (filtre en profondeur), les membranes en acétate ou en mélanges d'esters de cellulose (EC), les membranes en PVC, les coupelles pour CIP10 (mousse en polyuréthane) ; les cassettes IOM ; les capsules soudées à une membrane, ou les membranes en PTFE (Teflon®). Ces dernières ont été écartées de cette expertise car très sensibles aux charges électrostatiques (DFG MAK sampling aerosols). Par ailleurs, ce type de membrane est insoluble ce qui peut être problématique lorsque l'analyse des poussières prélevées nécessite une dissolution du support. Les capsules soudées à une membrane peuvent être de compositions variées (entièrement en ester de cellulose, entièrement en PVC ou avec une capsule en PVC et une membrane en ester de cellulose) ;
- les limites de quantification prises en compte (données issues des protocoles recensés et des requêtes bibliographiques complémentaires) pour l'évaluation des performances doivent être regardées comme fournissant des ordres de grandeur dans la mesure où ces valeurs sont, pour un même support, non seulement dépendantes des critères tels que les conditions environnementales, la sensibilité de la balance, etc. mais également de la durée de l'échantillonnage, des fournisseurs de supports voire des lots utilisés ;
- la masse maximale approximative pouvant être déposée sur les supports en fonction de leur nature et de leur taille a été déterminée à partir de l'indice de rétention⁴ disponible dans les protocoles recensés.

⁴ Indice de rétention : densité surfacique de matière collectée sur un filtre qu'il est recommandé de ne pas dépasser pour limiter les pertes de matière par choc, pendant le transport par exemple.

Résultats de l'évaluation des méthodes de mesure des PSES - fraction inhalable

Synthèse des performances des dispositifs de prélèvement vis-à-vis de la convention inhalable

A des vitesses d'air de l'ordre de 0,5 m.s⁻¹ voire inférieures, (cas le plus courant dans les atmosphères de travail (Baldwin *et al.*, 1998)) :

- l'IOM, le Button et le 7-hole surestiment la fraction conventionnelle ;
- la CFC seule sous-estime la fraction conventionnelle à partir de 20 - 30 µm ;
- la CFC + capsule interne, le GSP/CIS, le CIP10-I V2 et le PAS-6 sous-estiment la fraction conventionnelle à partir d'environ 40-50 µm ;
- la sensibilité de l'IOM, du Button, de la CFC, du 7-hole et du GSP à l'orientation par rapport au flux d'air (face, perpendiculaire ou opposé) a été étudiée et, quel que soit le dispositif, une orientation à 90° ou 180° diminue l'efficacité de captage et conduit à un sous-échantillonnage vis-à-vis de la fraction conventionnelle. La CFC est également très sensible à l'inclinaison de l'entrée du dispositif : une inclinaison vers le bas d'un angle de 45 à 90°, même si la CFC est orientée face au flux d'air, conduit à une efficacité de captage plus faible que lorsque que l'entrée est orientée horizontalement ;
- Plus la vitesse d'air est faible :
 - et plus l'efficacité de prélèvement augmente pour l'IOM, le Button et le GSP avec pour conséquence un sur-échantillonnage plus important, ainsi que pour la CFC + capsule interne avec pour conséquence un biais négatif moins important avec la courbe conventionnelle ;
 - et plus l'efficacité de prélèvement diminue pour le CIP10-I-V2 et la CFC seule, avec pour conséquence un biais négatif plus important par rapport à la courbe conventionnelle.

L'efficacité de prélèvement du PAS-6 n'a pas été étudiée pour des vitesses d'air inférieures à 0,5 m.s⁻¹, ni l'effet de l'orientation quelle que soit la vitesse d'air.

A des vitesses d'air plus élevées (1 à 4 m.s⁻¹) :

- dans les études sur mannequin tournant ou moyennant les résultats selon les différentes orientations, une diminution de l'efficacité de prélèvement est observée pour l'IOM, le 7-hole, le GSP, la CFC seule. Par contre, lorsque ces dispositifs sont orientés face au flux d'air, ces dispositifs montrent une augmentation de l'efficacité de prélèvement, hormis pour la CFC seule. L'efficacité de prélèvement de la CFC + capsule interne n'a pas été étudiée pour des vitesses d'air supérieures à 0,5 m.s⁻¹. Concernant le CIP10-I-V2, son efficacité de prélèvement est meilleure à une vitesse de 1 m.s⁻¹ qu'en air calme (le biais vis-à-vis de la convention diminue). Le Button sous-estime la fraction conventionnelle.

Quelle que soit l'étude prise en compte, la CFC seule est le dispositif de prélèvement qui présente des biais de sous-échantillonnage avec la convention inhalable les plus importants pour des particules de tailles supérieures à 20-30 µm avec un biais négatif inférieur à -25%.

L'efficacité d'échantillonnage du Button est moins dépendante de la vitesse de l'air que pour l'IOM, la CFC seule et le GSP. Cette efficacité est relativement similaire à celle de l'IOM.

Le dispositif « Flying saucer », en l'absence de données de validation, n'a pas été évalué pour le prélèvement de la fraction inhalable.

Synthèse de l'évaluation de la gravimétrie

Les membranes PVC et les filtres en fibres de quartz sont les supports de prélèvement les plus appropriés et permettent d'atteindre quasiment systématiquement 0,1 *VLEP-8h pour l'ensemble de

la gamme de valeurs de LQ retenues et ce quels que soient le diamètre des membranes et les débits d'utilisation, quels que soient donc les dispositifs de prélèvement.

En raison du coefficient de rétention des membranes PVC et filtres en fibres de quartz, seuls les dispositifs mettant en œuvre un débit de prélèvement de 1 à 2 L.min⁻¹ peuvent être utilisés pour effectuer un prélèvement de 8h à 2*VLEP-8h, c'est-à-dire IOM, CFC et CFC+capsule interne. Pour les dispositifs mettant en œuvre un débit de 3,5 ou 4 L.min⁻¹ (GSP, CIS et Button), il sera nécessaire d'effectuer 2 prélèvements de 4 heures.

Le CIP10 permet également d'effectuer des prélèvements de 8 heures à 10 L.min⁻¹.

Il est à noter que les membranes PVC sont électrostatiques dans certaines conditions. Il convient donc d'effectuer les corrections appropriées (pesées de blancs).

Les membranes EC ne permettent généralement pas d'atteindre le domaine 0,1 à 2 fois la VLEP-8h hormis dans le cas d'une utilisation avec une CFC + capsule interne à 2 L.min⁻¹.

Les filtres en fibres de quartz et de verre ne sont pas à privilégier pour une analyse gravimétrique en raison de la « dégradation » (pertes de fibres lors des manipulations), hormis dans le cas d'une utilisation avec l'IOM et d'une pesée de l'ensemble « cassette IOM + filtre ».

Résultats de l'évaluation des méthodes de mesure des PSES - fraction alvéolaire

Synthèse des performances des dispositifs de prélèvement vis-à-vis de la convention alvéolaire

La plupart des études expérimentales ont évalué ces dispositifs avec des aérosols de granulométrie allant jusqu'à environ 10 µm et pour des vitesses d'air allant de 0,15 à 4 m.s⁻¹.

A des vitesses d'air calme (de l'ordre de 0,5 m.s⁻¹ voire inférieures) :

- les dispositifs cyclones de type DO, HD, GK surestiment la fraction conventionnelle pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et sous-estiment la fraction conventionnelle pour les particules de diamètre supérieur à 4 µm ;
- le CIP-10-R sous-estime la fraction conventionnelle pour les particules de diamètre inférieur à 2 µm ;
- le cyclone GS 3 n'a pas fait l'objet d'étude expérimentale en air calme.

A des vitesses d'air plus élevée (1 à 4 m.s⁻¹) :

- la sensibilité du dispositif cyclone DO à la vitesse d'air, à l'orientation par rapport au flux d'air (face, perpendiculaire ou opposé) a été étudiée. Plus la vitesse d'air est élevée, plus l'efficacité de prélèvement diminue pour le cyclone DO avec pour conséquence un biais négatif plus important par rapport à la courbe conventionnelle. Des orientations à 90° et 180° ont également conduit à un sous-échantillonnage de la fraction alvéolaire (diamètres de coupure plus faibles et augmentation du biais) ;
- le dispositif cyclone de type GS3 étudié uniquement pour des vitesses d'air élevées présente de meilleures performances d'efficacité vis-à-vis de la fraction alvéolaire et n'est pas sensible à l'orientation du dispositif. Plus la vitesse d'air augmente, plus le biais augmente avec un sous-échantillonnage de la fraction alvéolaire ;
- les dispositifs cyclones de type HD, GK et le dispositif CIP-10-R n'ont pas fait l'objet d'étude expérimentale à des vitesses d'air élevées.

Les effets du dépôt sur les parois et des charges électrostatiques ont été étudiés pour les dispositifs de type cyclone DO et GS. Le cyclone DO est très sensible à ces facteurs et conduit à une efficacité de captage plus faible.

Les performances concernant les diamètres de coupure de 15 dispositifs de prélèvement dont 11 dispositifs utilisant des cyclones ont été évaluées en air calme sur des poussières de charbon polydispersées (Görner et al., 2001). Les auteurs montrent que ± 1 µm sur le diamètre de coupure à 50% (D50) peut être raisonnablement accepté et que le D50 peut être amélioré en adaptant le débit de pompe pour la plupart des dispositifs. Toutefois, plus le débit est faible, plus il est difficile

de l'adapter. Ils recommandent l'utilisation systématique des cartes de biais et de précisions afin de pouvoir estimer le sur- ou sous-échantillonnage.

Synthèse de l'évaluation de la gravimétrie

Les supports PVC de diamètre 25 mm sont appropriés et permettent d'atteindre quasiment systématiquement 0,1 fois la VLEP-8h pour l'ensemble de la gamme de valeurs de LQ et de débits retenus. La seule exception correspond au cas des débits de 1,5 et 1,7 L.min⁻¹. Toutefois ces LQ sont relativement anciennes et dépendantes des conditions de pesées. Etant très proches du dixième de la VLEP-8h, elles devraient pouvoir être optimisées pour atteindre ce seuil.

Les membranes PVC de diamètre 37 mm ainsi que les filtres en fibres de verre ou de quartz (diamètre 25 ou 37mm) conviennent si la limite basse de la gamme des valeurs de LQ retenues est prise en compte. Les filtres en fibres de quartz ou de verre ne sont pas à privilégier pour une analyse gravimétrique en raison de la sensibilité à la « dégradation » (pertes de fibres lors des manipulations).

Concernant les mousses PU et les membranes EC la limite de quantification ne permet pas d'atteindre le dixième de la VLEP-8h.

Synthèse de l'efficacité des dispositifs de prélèvement simultané des fractions inhalable et alvéolaire

Seul le protocole HSE MDHS 14/4 mentionne plusieurs dispositifs qui permettent de mesurer simultanément plusieurs fractions conventionnelles : IOM Dual fraction, CIS multi-fraction respirable sampler et les impacteurs Respicon, Mini Moudi, Sioutas et Marple.

Aucune étude expérimentale n'a évalué l'efficacité d'échantillonnage de ces dispositifs vis-à-vis des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire. Les dispositifs de prélèvement simultané de la fraction inhalable et alvéolaire ne sont donc pas recommandés tant pour la mesure de la fraction inhalable que pour la mesure de la fraction alvéolaire.

Les données disponibles comparent plusieurs dispositifs entre eux.

Le dispositif de prélèvement IOM Dual sampler est sensible à l'empoussièrement, le diamètre de coupure moyen D50 variant avec la charge de la mousse PU en amont du filtre de collecte.

Les impacteurs à multi-étages nécessitant la pesée de plusieurs filtres pour obtenir la fraction alvéolaire présentent des incertitudes importantes liées au cumul des erreurs de pesées.

Le CIS multi-fraction respirable sampler n'a pas pu être évalué faute d'études identifiées documentant ses performances.

Conclusions de l'expertise collective

La mesure de la concentration en PSES à des fins de comparaison avec la VLEP-8h inhalable ou alvéolaire consiste à effectuer un prélèvement d'aérosol puis une analyse gravimétrique.

Différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable et de la fraction alvéolaire sont décrits au travers des protocoles recensés. Les performances de ces dispositifs quant à leur efficacité de collecte vis-à-vis des conventions inhalable et alvéolaire ont été déterminées dans des études expérimentales de laboratoire. Divers paramètres, notamment la nature des poussières et les conditions environnementales (distribution granulométrique, taux d'empoussièrement, vitesse d'air, orientation du dispositif) influent sur les efficacités d'échantillonnage au regard des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire.

Sur la base des normes et protocoles existants ainsi que des études expérimentales, les différents dispositifs présentent des efficacités d'échantillonnage variables, dépendantes de la granulométrie de l'aérosol et des conditions environnementales notamment la vitesse d'air et l'orientation du dispositif.

Aucun dispositif ne répond parfaitement aux exigences en termes d'efficacité d'échantillonnage au regard de la fraction conventionnelle inhalable ou alvéolaire dans toutes les situations environnementales et sur l'ensemble de la plage granulométrique d'intérêt.

Dans l'intérêt de la prévention, le CES a fait le choix de favoriser les dispositifs qui surestiment les fractions conventionnelles considérées (et donc de déclasser ceux qui sous-estiment ces mêmes fractions).

VLEP-8h – fraction inhalable :

Concernant les dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable évalués au regard du critère « conformité à la fraction conventionnelle inhalable » :

- **la CFC seule, le PAS-6 et le CIP 10-I-V1 sont classés en catégorie 3 et ne sont donc pas recommandés pour le prélèvement de la fraction inhalable.** En effet :
 - la CFC seule, bien qu'elle soit la plus proche de la fraction conventionnelle pour des aérosols de granulométrie $< 20-30 \mu\text{m}$, présente un sous-échantillonnage important à partir de $20-30 \mu\text{m}$, quelle que soit la vitesse d'air. Ce sous-échantillonnage est le plus important de tous les dispositifs évalués. Il est noté une diminution de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air les plus faibles et supérieures ou égales à $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ce dispositif de prélèvement est également particulièrement sensible à l'orientation, tant dans un plan horizontal que vertical. L'efficacité de collecte de la CFC (seule) n'est donc pas satisfaisante ;
 - le comportement du PAS-6 vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable à des vitesses d'air inférieures à $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ n'a pas été étudié, ni l'influence de l'orientation de ce dispositif vis-à-vis du flux d'air sur l'efficacité de prélèvement ;
 - le CIP10-I-V1 a fait l'objet de modification dans sa conception afin d'améliorer ses performances. La version 2 présente une efficacité d'échantillonnage supérieure et un biais vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable moins important.
- **Le Button, la CFC + capsule interne, le CIP10-I-V2, le GSP-3.5, l'IOM et le 7-Hole sont classés en catégorie 2 et sont recommandés pour le prélèvement de la fraction inhalable.** En effet :
 - les biais observés dans les conditions proches de l'air des lieux de travail (vitesse d'air $\leq 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) vis-à-vis de la convention sont moindres que ceux observés avec la CFC seule ;
 - la sous-estimation de la fraction conventionnelle débute pour des particules de tailles plus grandes (environ 40 à $50 \mu\text{m}$ pour le GSP-3,5 et la CFC + capsule interne contre $20-30 \mu\text{m}$ la CFC seule) ;
 - le Button semble être plus précis et moins sensible à la vitesse d'air que les autres dispositifs ;
 - le Button et l'IOM ont tendance à surestimer la fraction conventionnelle. Le 7-Hole la surestime dans des conditions d'orientation face au flux d'air et pour des vitesses d'air faibles.

Concernant l'analyse gravimétrique, celle-ci n'est pas un facteur limitant à condition d'utiliser des membranes PVC et filtres en fibres de quartz pour les dispositifs autres que le CIP10 I-V2 et ce, à condition de respecter également les recommandations en matière de pesée décrites dans le paragraphe 4.3.1 du rapport d'expertise collective. **Les différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable permettent tous de couvrir les domaines de 0,1 à 2*VLEP-8h définie pour la fraction inhalable, avec des prélèvements de 8 heures ou bien 2 prélèvements successifs de 4 heures. Les membranes en PVC sont à privilégier en raison de la potentielle perte de fibres lors des manipulations des filtres en fibres de quartz ou de verre.**

VLEP-8h – fraction alvéolaire :

Concernant les dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire évalués au regard du critère « conformité à la fraction conventionnelle » :

- **les cyclones GS-1 et la coupelle CIP-10-R sont classés en catégorie 3 et ne sont donc pas recommandés pour la mesure de la fraction alvéolaire.** En effet :
 - o le dispositif GS-1 n'a pas fait l'objet d'études expérimentales pour évaluer ses performances ;
 - o le CIP10-R présente une faible efficacité de collecte des particules de diamètre inférieur à 2 µm.
- **les cyclones Higgins-Dewell (HD) qui se distinguent par des géométries et débits différents, Dorr-Oliver (DO), GK2.69 et 4.162, AI, GS-3 sont classés en catégorie 2 et sont recommandés pour la mesure de la fraction alvéolaire.** En effet :
 - o des écarts peu importants à la courbe conventionnelle sont observés avec une surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm ;
 - o les méthodes de prélèvement les plus décrites et utilisées mettent en œuvre des cyclones (HD, DO, AI, GS-3). Une optimisation du débit d'échantillonnage a été étudiée pour ces dispositifs pour une meilleure comparaison à la fraction conventionnelle alvéolaire en améliorant les performances et est recommandée dans le cadre de cette expertise ;
 - o lorsque des cassettes sensibles aux charges électrostatiques sont utilisées, des dépôts sur les parois sont possibles ;
 - o les cyclones Higgins Dewell HD (SIMPEDS, FSP2, Casella plastic, SKC plastic cyclone, BGI4L, FSP10) n'ont pas fait l'objet d'études sur l'orientation du dispositif, l'influence de l'humidité relative et les types, concentration et charge électrostatique de l'aérosol contrairement au cyclone DO ;
 - o les dispositifs cyclone à haut débit (FSP10, GK2.69 et GK 4.162) peuvent induire une perte de charge plus importante et peuvent être plus contraignants en raison du poids plus important de la pompe de prélèvement.

Concernant l'analyse gravimétrique :

- les supports PVC de diamètre 25 mm sont appropriés et permettent d'atteindre quasiment systématiquement 0,1 fois la VLEP-8h pour l'ensemble de la gamme de valeurs de LQ et de débits retenus. La seule exception correspond aux débits de 1,5 et 1,7 L.min⁻¹ pour lesquels la LQ doit être optimisée ;
- les membranes PVC de diamètre 37 mm ainsi que les filtres en fibres de verre ou de quartz (diamètre 25 ou 37mm) conviennent si la limite basse de la gamme des valeurs de LQ retenues est prise en compte ;
- les filtres en fibres de quartz ou de verre ne sont pas à privilégier pour une analyse gravimétrique en raison d'une sensibilité à l'humidité et à la « dégradation » (pertes de fibres lors des manipulations) ;
- concernant les mousses PU, la limite de quantification ne permet pas d'atteindre le dixième de la VLEP-8h ;

Les dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire permettent donc de couvrir les domaines de 0,1 à 2*VLEP-8h, à condition de respecter les recommandations en matière de pesée décrites dans le paragraphe 4.3.1 du rapport d'expertise collective avec des prélèvements de 8 heures ou bien 2 prélèvements successifs de 4 heures. Seul le CIP10-R ne permet pas de couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h définie pour la fraction alvéolaire.

Concernant les dispositifs d'échantillonnage simultané des fractions inhalable et alvéolaire, aucune étude expérimentale n'a évalué leur efficacité d'échantillonnage vis-à-vis des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire. Ces dispositifs n'ont pas pu être évalués et sont donc classés en catégorie 3^(*). Ils ne sont donc pas recommandés tant pour la mesure de la fraction inhalable que pour la mesure de la fraction alvéolaire.

Ainsi, compte tenu des données actuellement disponibles de comparaison des performances d'échantillonnage vis-à-vis des fractions conventionnelles et de l'évaluation des performances en terme de gravimétrie, le CES recommande pour la mesure de la concentration en PSES aux fins de comparaison avec les VLEP-8h établies par le CES, les dispositifs de prélèvement des fractions inhalable et alvéolaire suivants tout en gardant bien à l'esprit leurs limites spécifiques d'utilisation rappelées dans les tableaux ci-dessous. Ces méthodes de mesures sont classées en catégorie 2, considérées comme indicatives et nécessitant de vérifier leurs performances pour l'environnement dans lequel elles doivent être mises en œuvre.

^(*) Dispositif de prélèvement non évaluable en l'absence de données de validation

Tableau 2 : Méthodes recommandées pour la mesure des PSES au regard de la VLEP-8h définie pour la fraction inhalable

| Dispositif de prélèvement | Protocoles / Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|---------------------------|--|-----------------|-------------|-----------------|--|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| Button | FD CEN/TR 15230 HSE MDHS 14-4, INHST CR 003 A06, INSHT MTA/MA 014/A11 Li et al., 2000 Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000b Aizenberg et al., 2001 Witschger et al. 2004 Görner et al., 2010 Sleeth et al., 2012 | 2 | 1B | 2 | Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles Légère augmentation de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$ Gravimétrie : utilisation de filtre PVC 25 mm - | Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h |
| CFC + capsule interne | NIOSH 0501, INRS MétroPol M-274, INRS MétroPol cassette, NF X43-257 Görner <i>et al.</i> , 2010 | 2 | 1A | 2 | Effet de l'inclinaison non étudié. Sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 μm Biais moins important avec la courbe conventionnelle inhalable aux vitesses d'air faibles. L'efficacité de prélèvement n'a pas été étudiée pour des vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$. | 8h |
| CIP-10 I V2 | MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 IRSST MA-373 INHST MTA/MA_014_A11 Görner <i>et al.</i> , 2009 Görner et al., 2010 | 2 | 1A | 2 | Sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 μm Diminution de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air faibles (sous-estimation plus importante) Augmentation de l'efficacité de prélèvement à 1 m.s^{-1} | 8h |

| Dispositif de prélèvement | Protocoles / Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|---------------------------|---|-----------------|-------------|-----------------|--|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| | | | | | (diminution du biais vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable) Gravimétrie : le dixième de la VLEP-8h est obtenu avec la limite basse de la LQ. | |
| GSP-3.5 / CIS | BIA 7284 DFG MAK sampling and determining aerosols FD CEN/TR 15230 MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 INSHT MTA/MA_014_A11 Kenny et al. 1997 Li et al., 2000 Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000a Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000b Aizenberg et al., 2001 Sleeth et al., 2012 | 2 | 1B | 2 | Sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 µm. Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles Aux vitesses d'air ≥ 1 m.s ⁻¹ , augmentation ou diminution de l'efficacité de prélèvement selon l'orientation (face au flux d'air ou moyennée) Dépôt sur les parois pouvant être important pour les diamètres aérodynamiques équivalents les plus élevés. | Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h |
| IOM | MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 IRSST MA-373 INHST MTA/MA_014_A11 Kenny, Aitken, et al., 1997 Kenny et al., 1999 Li et al., 2000 Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000a | 2 | 1A | 2 | Possible captation de grosses particules émises dans certains procédés via l'ouverture du dispositif Sur-échantillonnage des particules de diamètre supérieur à 70 µm Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles. Aux vitesses d'air ≥ 1 m.s ⁻¹ , augmentation ou diminution de l'efficacité de prélèvement selon | 8h |

| Dispositif de prélèvement | Protocoles / Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|---|---|-----------------|-------------|-----------------|---|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| | Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000b Aizenberg <i>et al.</i> , 2001 Paik <i>et al.</i> , 2004 Görner <i>et al.</i> , 2009 Witschger <i>et al.</i> , 2004 Görner <i>et al.</i> , 2010 Sleeth <i>et al.</i> , 2012 | | | | l'orientation (face au flux d'air ou moyennée) | |
| 7-hole | HSE MDHS 14/4 Kenny, Aitken, <i>et al.</i> , 1997 Kenny <i>et al.</i> , 1999 Li <i>et al.</i> , 2000 | 2 | 1A | 2 | Légère sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-delà de 30 µm à 0,5 m.s⁻¹ mais surestimation à des vitesses d'air plus faibles. Surestimation dans des conditions d'orientation face au flux d'air | 8h |
| (*) conformité du dispositif de prélèvement à la fraction conventionnelle inhalable | | | | | | |

Tableau 3 : Méthodes recommandées pour la mesure des PSES au regard de la VLEP-8h définie pour la fraction alvéolaire

| Dispositif de prélèvement | Protocoles/Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|---------------------------|--|-----------------|-------------|-----------------|--|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| Cyclone DO | MétroPol Cyclone (2019) INSHT MTA-MA014/A11 OSHA PV 2121 Niosh 0600 NF X 43-259 FD CEN 15230 Lidén & Kenny, 1993 Kar <i>et al.</i> , 1995 Gautam <i>et al.</i> , 1997 Chen <i>et al.</i> , 1999 ; Tsai <i>et al.</i> , 1999 Görner <i>et al.</i> , 2001 | 2 | 2 | 2 | Surestimation pour des particules de tailles de 1 à 4 µm et sous-estimation pour les particules de tailles comprises entre 4 et 10 µm ↓ D ₅₀ et ↑ Biais avec des vitesses d'air élevées et des orientations du dispositif à 90 et 180° Problématique de dépôt sur les parois, d'effet de charges électrostatiques Gravimétrie : optimisation des LQ nécessaires pour atteindre 0,1*VLEP-8h | Nécessité de réaliser 1 prélèvement de 8h |
| Cyclone AI | Niosh 0600 FD CEN 15230 Chen <i>et al.</i> , 1999 Tsai <i>et al.</i> , 1999 Görner <i>et al.</i> , 2001 | 2 | 1A | 2 | Surestimation pour des particules de tailles de 1 à 4 µm et sous-estimation pour les particules de tailles comprises entre 4 et 10 µm Pas d'influence du dépôt sur les parois, ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol | 8h |
| Cyclone GS3 | MétroPol Cyclone (2019) HSE MDHD 14/4 FD CEN 15230 INSHT MTA-MA014/A11 Gautam <i>et al.</i> , 1997 Chen <i>et al.</i> , 1999 | 2 | 1B | 2 | Surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm Pas de différence en fonction de l'orientation du dispositif ↑ Biais à une vitesse d'air très élevée Pas d'effet de dépôt sur les parois ni de charges électrostatiques | nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4 h. |

| Dispositif de prélèvement | Protocoles/ Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|--|------------------------|--|-------------|-----------------|---------|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| eCyclone HD | FSP 10 | IFA 6068 DFG MAK Lee <i>et al.</i> , 2010 | 2 | 1B | 2 | Perte de charge du fait du haut débit Surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm Pas d'études concernant des vitesses d'air élevées, ni l'influence de l'orientation du dispositif, de l'humidité relative ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol. Préconisation de pesée filtre + cassette Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h |
| | SIMPEDS – FSP2 | NIOSH 0600 HSE MDHS 14/4 Görner <i>et al.</i> , 2001 Liden & Kenny 1993 | 2 | | | |
| | SKC Plastic | SKC Plastic cyclone notice (2019) | 2 | | | |
| Cyclone GK | GK 2.69 | HSE MDHS 14/4 FD CEN 15230 Kenny & Gussman, 1997 Lee <i>et al.</i> , 2010 | 2 | 1B | 2 | Perte de charge du fait du haut débit Surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm Pas d'études concernant des vitesses d'air élevées, ni l'influence de l'orientation du dispositif, de l'humidité relative, ni du type, concentration de l'aérosol. Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h |
| | GK 4.162 | Thorpe, 2011 | 2 | 1B | 2 | |
| (*) conformité du dispositif de prélèvement à la fraction conventionnelle alvéolaire | | | | | | |

Sigles et abréviations

Al : Aluminium

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire alimentation-environnement-travail

B : Biais

BGI : Berufsgenossenschaften Informationen

C : Concentration

CEN : Comité Européen de Normalisation

CES : Comité d'Experts Spécialisé

CIP : Capteur Individuel de Particules

CIS : Conical Inhalable Sampler

CLP : Classification, Labelling and Packaging of substances and mixtures - classification des produits chimiques

COCT : Conseil d'Orientation sur les Conditions de Travail

D₅₀ : diamètre de coupure

Dae : Diamètre aérodynamique équivalent

DFG : Deutsche Forschungsgemeinschaft (Fondation allemande pour la recherche)

DO : Dorr Oliver

E : Efficacité de prélèvement

GSP : Gesamtstaub-Probenahmesystem

GT : Groupe de Travail

HCSP : Haut conseil de la santé publique

HD : Higgins Dewell

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité

INSHT : Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo

INSST : Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo

IOM : Institut of occupational medicine

IRSST : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

ISO : International Standard Organization

MAK : Maximale Arbeitsplatzkonzentration(en)

MG : Moyenne géométrique

OFC : Open face cassette

PST : Porosité

PUF : Polyuréthane

PVC : Polychlorure de vinyle

REACH : Registration, Evaluation and Autorisation of CHemicals (enregistrement, évaluation et autorisation des substances chimiques)

SIMPEDS : Safety in Mines Personal Dust Sampler

U : incertitude élargie

VGAI : Valeurs Guides de qualité d'Air Intérieur

VLEP : valeur limite d'exposition professionnelle

VSR : Valeurs sanitaires de référence

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Détail des méthodes de mesure des PSES | 16 |
| Tableau 2 : Méthodes recommandées pour la mesure des PSES au regard de la VLEP-8h définie pour la fraction inhalable | 25 |
| Tableau 3 : Méthodes recommandées pour la mesure des PSES au regard de la VLEP-8h définie pour la fraction alvéolaire | 28 |
| Tableau 4 : définitions des trois principales fractions et conventions et spécifications pour l'échantillonnage des aérosols dans l'air des lieux de travail (NF EN 481, NF ISO 7708)..... | 35 |
| Tableau 5 : Tableau récapitulatif des dispositifs de prélèvement des poussières mentionnés dans les protocoles recensés | 40 |
| Tableau 6 : Principaux facteurs d'influence sur les performances des dispositifs de prélèvement d'aérosols (NF EN 13205-1) | 42 |
| Tableau 7 : Récapitulatif des limites de quantification retenues pour chaque support de prélèvement (en µg) | 47 |
| Tableau 8: Récapitulatif des limites de charge (en mg) en fonction des supports et de R | 47 |
| Tableau 9 : Classement des échantillonneurs par ordre de précision et répétabilité décroissante | 60 |
| Tableau 10 : Synthèse du classement des dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable au regard de l'efficacité de prélèvement..... | 63 |
| Tableau 11 : Concentrations obtenues à partir des LQ des différents supports compatibles avec les dispositifs de prélèvements de la fraction inhalable..... | 64 |
| Tableau 12 : Charge maximale du support PVC ou EC (en mg) à 2 VLEP-8h inhalable, en fonction du temps de prélèvement et du débit de prélèvement..... | 65 |
| Tableau 13 : Evaluation détaillée des dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire..... | 79 |
| Tableau 14 : Concentrations obtenues à partir des LQ des différents supports compatibles avec les dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire | 81 |
| Tableau 15 : Charge maximale du support (en mg) à 2 VLEP-8h alvéolaire, en fonction du temps de prélèvement et du débit de prélèvement | 82 |
| Tableau 16 : caractéristiques de prélèvement et données fournies dans les protocoles pour les préleveurs de plusieurs fractions..... | 83 |
| Tableau 17: Evaluation détaillée des dispositifs de prélèvement simultané de la fraction inhalable et alvéolaire | 88 |
| Tableau 18 : Méthodes recommandées pour la mesure des PSES au regard de la VLEP-8h définie pour la fraction inhalable | 92 |
| Tableau 19 : Méthodes recommandées pour la mesure des PSES au regard de la VLEP-8h définie pour la fraction alvéolaire | 94 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Recensement des protocoles..... | 15 |
| Figure 2 : Principe général (Anses, 2020) | 38 |
| Figure 3 : Recensement des protocoles | 39 |
| Figure 4 : Comparaison de l'efficacité de différents préleveurs, mannequin en rotation, vitesse d'air = 0,5 m.s ⁻¹ (d'après Kenny <i>et al.</i> 1997) | 58 |
| Figure 5 : Comparaison de l'efficacité de différents préleveurs, orientation 0° (face au flux d'air), vitesse d'air=0,55 m.s ⁻¹ (d'après Li <i>et al.</i> , 2000) | 59 |

| | |
|---|----|
| Figure 6 : Comparaison de l'efficacité de différents préleveurs, mannequin en rotation, air calme (vitesse d'air $\ll 0,5 \text{ m.s}^{-1}$) (d'après Görner <i>et al.</i> , 2010) | 59 |
| Figure 7 : Comparaison de l'efficacité de différents préleveurs vis-à-vis de la convention alvéolaire à vitesse d'air calme | 76 |
| Figure 8 : Comparaison de l'efficacité de 2 cyclones HD aux débits optimisés vis-à-vis de la convention alvéolaire à vitesse d'air calme | 76 |

1 Introduction

1.1 Contexte

L'Agence nationale de sécurité sanitaire : alimentation-environnement-travail (Anses) élabore et recommande plusieurs types de valeurs de référence dans l'air fondées sur des **critères exclusivement sanitaires**, permettant de caractériser le lien entre une exposition aérienne à une substance chimique et l'occurrence d'un effet néfaste observé. Ces valeurs élaborées par le CES « Valeurs sanitaires de référence » peuvent ensuite être utilisées par les pouvoirs publics en vue de fixer des valeurs réglementaires :

- les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) ;
- les valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAI)

Le dispositif français d'établissement des VLEP comporte trois phases clairement distinctes :

- une phase d'expertise scientifique indépendante confiée à l'Afsset dans le cadre du plan santé au travail 2005-2009 (PST), puis à l'Anses suite à la fusion de l'Afsset et de l'Afssa en 2010 ;
- une phase d'établissement d'un projet réglementaire de valeur limite contraignante ou indicative par le ministère chargé du travail ;
- une phase de concertation sociale lors de la présentation du projet réglementaire au sein du Conseil d'Orientation sur les Conditions de Travail (COCT). L'objectif de cette phase étant de discuter de l'effectivité des valeurs limites et de déterminer d'éventuels délais d'application, fonction de conditions de faisabilité technico-économique.

Le contrôle technique des VLEP est encadré par les dispositions du Code du travail (articles R. 4412-27 à R. 4412-31 pour les agents chimiques dangereux et articles R. 4412-76 à R. 4412-80 pour les agents chimiques classés cancérogènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction (CMR)). Ces dispositions sont complétées par l'arrêté du 15 décembre 2009 relatif aux contrôles techniques des valeurs limites d'exposition professionnelle sur les lieux de travail et aux conditions d'accréditation des organismes chargés des contrôles (publié au journal officiel du 17 décembre 2009).

Pour faire face à l'enjeu sanitaire que représente la qualité de l'air intérieur et apporter aux pouvoirs publics des éléments utiles à la gestion de ce risque, l'Anses s'est autosaisie en 2004 afin d'élaborer des valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAI) en France. Les VGAI proposées par l'Anses constituent le socle initial du processus institutionnel visant à fixer des valeurs réglementaires de surveillance de la qualité de l'air intérieur.

Afin d'appuyer les pouvoirs publics dans l'élaboration de valeurs opérationnelles permettant de mettre en place des actions d'amélioration de la qualité d'air intérieur, le ministère chargé de la santé sollicite usuellement le Haut conseil de la santé publique (HCSP) en vue de proposer, à partir des VGAI de l'Anses, des valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos, ainsi qu'un calendrier pour leur déploiement. Le HCSP tient compte, dans ses propositions, de considérations pratiques, réglementaires, juridiques, économiques et sociologiques.

Enfin, conformément à la loi du 1er août 2008 relative à la responsabilité environnementale, les VGAI réglementaires sont établies par le ministère chargé de l'écologie, inscrites dans le code de l'environnement et sont associées à des mesures de gestion.

La surveillance de la qualité de l'air intérieur s'est mise en place progressivement notamment dans les établissements accueillant des enfants⁵. Les moyens d'aération devront être évalués et la mesure du formaldéhyde, du benzène et du dioxyde de carbone sera réalisée dans certains établissements recevant du public avec des dispositions particulières de prévention de la qualité de

⁵ Comme prévu par le décret 2011-1728 du 2 décembre 2011

l'air⁶. Les mesures de polluants seront en particulier mises en regard des valeurs-guides pour l'air intérieur et de valeurs déclenchant des investigations complémentaires.

Les travaux d'expertise de l'Anses concernant les VGAI et les VLEP comprennent également une évaluation des méthodes de mesures disponibles pour la comparaison des niveaux d'exposition sur le lieu de travail et dans l'air intérieur avec les valeurs recommandées par l'Anses ou dans des directives européennes.

1.2 Objet de la saisine

L'évaluation des méthodes de mesure des poussières sans effet spécifique a été réalisée dans le cadre de la mission pérenne d'expertise sur l'élaboration de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP).

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre (Anses, CES, GT, rapporteur(s)) et organisation

Pour poursuivre les travaux d'expertise relatifs aux VLEP et aux VGAI réalisés à l'Anses depuis respectivement 2007 et 2005, un groupe de travail (GT) « Métrologie » dans une nouvelle configuration a été créé en août 2017. Celui-ci est à présent rattaché à 2 comités d'experts spécialisés (CES) :

- « Valeurs sanitaires de référence » (CES VSR)
- « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » (CES Air)

Ses travaux d'expertise sont répartis entre les deux CES en fonction de leur nature.

Le rôle de ce groupe de travail est d'évaluer les méthodes de mesure disponibles afin de recommander la ou les méthodes les plus appropriées pour la mesure des concentrations dans l'air aux fins de comparaison aux valeurs de référence recommandées par l'Anses.

De façon à garder une cohérence dans les recommandations effectuées pour différentes substances, le GT s'est appuyé sur la démarche d'évaluation actualisée et enrichie récemment des méthodes de mesure des polluants dans l'air au regard des valeurs de référence (Anses, 2020).

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES VSR tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet unique « DPI » géré par le ministère chargé de la santé (<https://dpi.sante.gouv.fr>).

⁶ Décret n°2012-14 du 5 janvier 2012 et décret 2015-1000 du 17 août 2015

2 Informations générales

2.1 Fractions granulométriques

La norme NF EN 481 définit plusieurs fractions granulométriques des particules en suspension dans l'air en lien avec leur pénétration dans l'arbre respiratoire, ainsi que les conventions d'échantillonnage de ces fractions. Ces conventions sont issues de données expérimentales, et ont été adoptées par consensus entre l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH), l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et le Comité européen de normalisation (CEN) (Vincent, 2012)⁷. Elles constituent des spécifications cibles pour les systèmes d'échantillonnage des aérosols.

Tableau 4 : définitions des trois principales fractions et conventions et spécifications pour l'échantillonnage des aérosols dans l'air des lieux de travail (NF EN 481, NF ISO 7708)

| Fraction | | Convention | Spécification pour la convention = pourcentage de particules en suspension dans l'air à collecter |
|-------------------|--|---|--|
| Inhalable | Fraction massique des particules totales en suspension dans l'air inhalée par le nez et la bouche. | Spécification cible pour les instruments d'échantillonnage lorsque la fraction inhalable est la fraction intéressante. | $E_i(\%) = 50 (1 + \exp(-0,06 \cdot D_{ae}))$ Avec : E_i = pourcentage de particules en suspension dans l'air à collecter D_{ae} = diamètre aérodynamique |
| Thoracique | Fraction massique des particules inhalées pénétrant au-delà du larynx ⇒ Constitue une sous fraction de la fraction inhalable. | Spécification cible pour les instruments d'échantillonnage lorsque la fraction thoracique est la fraction intéressante. | Loi de distribution log-normale cumulée avec une médiane à 11,6 µm et un écart type géométrique de 1,5. |
| Alvéolaire | Fraction massique des particules inhalées qui pénètrent dans les voies aériennes non ciliées. ⇒ Constitue une sous fraction de la fraction inhalable. | Spécification cible pour les instruments d'échantillonnage lorsque la fraction alvéolaire est la fraction intéressante. | Loi de distribution log-normale cumulée avec une médiane à 4,25 µm et un écart type géométrique de 1,5 |

⁷ Une expertise de l'Anses est actuellement en cours sur l'historique de l'établissement de ces conventions et la comparaison scientifique avec les conventions utilisées pour l'échantillonnage des aérosols dans l'air ambiant.

Deux autres conventions peuvent se déduire des précédentes par calcul : les conventions extrathoraciques⁸ et trachéobronchiques⁹.

Dans le cadre du contrôle technique réglementaire des VLEP, lorsque l'agent chimique considéré est présent dans l'air sous la forme d'un aérosol, la mesure de la concentration dans l'air doit prendre en compte la fraction conventionnelle d'intérêt.

2.2 Réglementation

Classification et étiquetage : Règlement (CE) 1272/2008 dit règlement CLP :

Les poussières dites sans effet spécifique ne font pas l'objet d'une classification harmonisée au titre du règlement CLP.

Règlement (CE) n°1907/2006 dit Règlement REACH :

Les poussières dites sans effet spécifique ne font pas l'objet d'un dossier d'enregistrement.

⁸ Convention extrathoracique : spécification cible pour les instruments d'échantillonnage lorsque la fraction extrathoracique (fraction massique des particules inhalées qui ne peuvent pas pénétrer au-delà du larynx) est la fraction intéressante (NF EN 481, NF ISO 7708)

⁹ Convention trachéobronchique : spécification cible pour les instruments d'échantillonnage lorsque la fraction trachéobronchique (fraction massique des particules inhalées qui pénètrent au-delà du larynx, mais qui ne peuvent pénétrer dans les voies aériennes non ciliées) est la fraction intéressante (NF EN 481, NF ISO 7708)

3 Valeurs de référence

3.1 VLEP françaises

L'article R 4222-10 du Code du travail définit les concentrations moyennes en poussières totales et alvéolaires de l'atmosphère inhalée par un travailleur, évaluées sur une période de huit heures à ne pas dépasser dans les locaux à pollution spécifique :

- Poussières totales (fraction inhalable) : VLEP-8h = 10 mg.m⁻³
- Poussières alvéolaires : VLEP-8h = 5 mg.m⁻³.

La circulaire du Ministère du Travail du 9 mai 1985 précise que ces poussières ne sont pas en mesure de provoquer seules sur les poumons ou sur tout autre organe ou système du corps humain d'autre effet que celui de surcharge.

Ces valeurs limites sont utilisées pour dimensionner ou vérifier les performances des installations de captage et de ventilation (Article R4222-13), ainsi que de recyclage d'air (Article R4222-14, R4222-16). Le contrôle de ces valeurs limites est effectué par des organismes agréés dans le cadre des vérifications de la conformité de l'aération et de l'assainissement des lieux de travail et n'entrent pas dans le cadre du contrôle du risque chimique (Circulaire DGT 2010/03 du 13 avril 2010 relative au contrôle du risque chimique des lieux de travail renvoyant aux articles R4722-1, R 4722-2, R4724-2 et R 4724-3 du Code du Travail). L'inspecteur du travail peut prescrire au chef d'établissement de faire procéder par une personne ou un organisme agréé une mesure de la concentration en poussières totales et alvéolaires pour vérifier le respect de ces valeurs limites (arrêté du 9 octobre 1987 relatif au contrôle de l'aération et de l'assainissement des locaux de travail pouvant être prescrit par l'inspecteur du travail, Code du travail Article R232-5-10).

Par ailleurs, l'article 2 du Décret n°2013-797 du 30 août 2013 fixant certains compléments et adaptations spécifiques au code du travail pour les mines et carrières en matière de poussières alvéolaires précise : « en complément de l'article R. 4222-10 du code du travail et sans préjudice des articles R. 4412-149 et R. 4412-154, les concentrations moyennes en poussières alvéolaires de l'atmosphère inhalée par un travailleur, évaluées sur une période de huit heures, s'appliquent également aux lieux de travail se trouvant à l'extérieur.

Ces concentrations font l'objet d'un contrôle annuel par un organisme accrédité ou agréé selon l'objet du contrôle, dans des conditions fixées par un arrêté du ministre chargé des mines, du ministre chargé des carrières et du ministre chargé du travail. Toutefois, lorsque les résultats de l'évaluation des risques à laquelle procède l'employeur en application des articles L. 4121-3 et R. 4412-5 du code du travail ne présentent qu'un risque faible pour la santé et la sécurité des travailleurs, au sens de l'article R. 4412-13, et que les mesures de prévention prises sont suffisantes pour réduire ce risque, l'employeur peut ne pas procéder à ce contrôle. ».

3.2 VLEP établies par le CES VSR

Le CES a recommandé les valeurs suivantes :

- fraction inhalable : VLEP-8h = 4 mg.m⁻³
- fraction alvéolaire : VLEP-8h = 0,9 mg.m⁻³

4 Méthodes de mesure dans l'air des lieux de travail et dans l'air intérieur

Les méthodes de mesure de la concentration d'une substance dans l'air des lieux de travail et l'air intérieur sont évaluées de manière à recommander une ou plusieurs méthodes de référence permettant d'effectuer des mesures de concentration de la substance à des fins de comparaison avec les valeurs de référence proposées par l'Anses ou établies dans des directives européennes.

L'objectif n'est pas de classer l'ensemble des méthodes selon un système de notation chiffrée mais plutôt de présenter de manière structurée et systématique les critères permettant d'arriver à un choix final fondé sur un jugement scientifique.

La méthodologie détaillée a fait l'objet d'un rapport du groupe de travail « Métrologie ». Le principe général est le suivant.

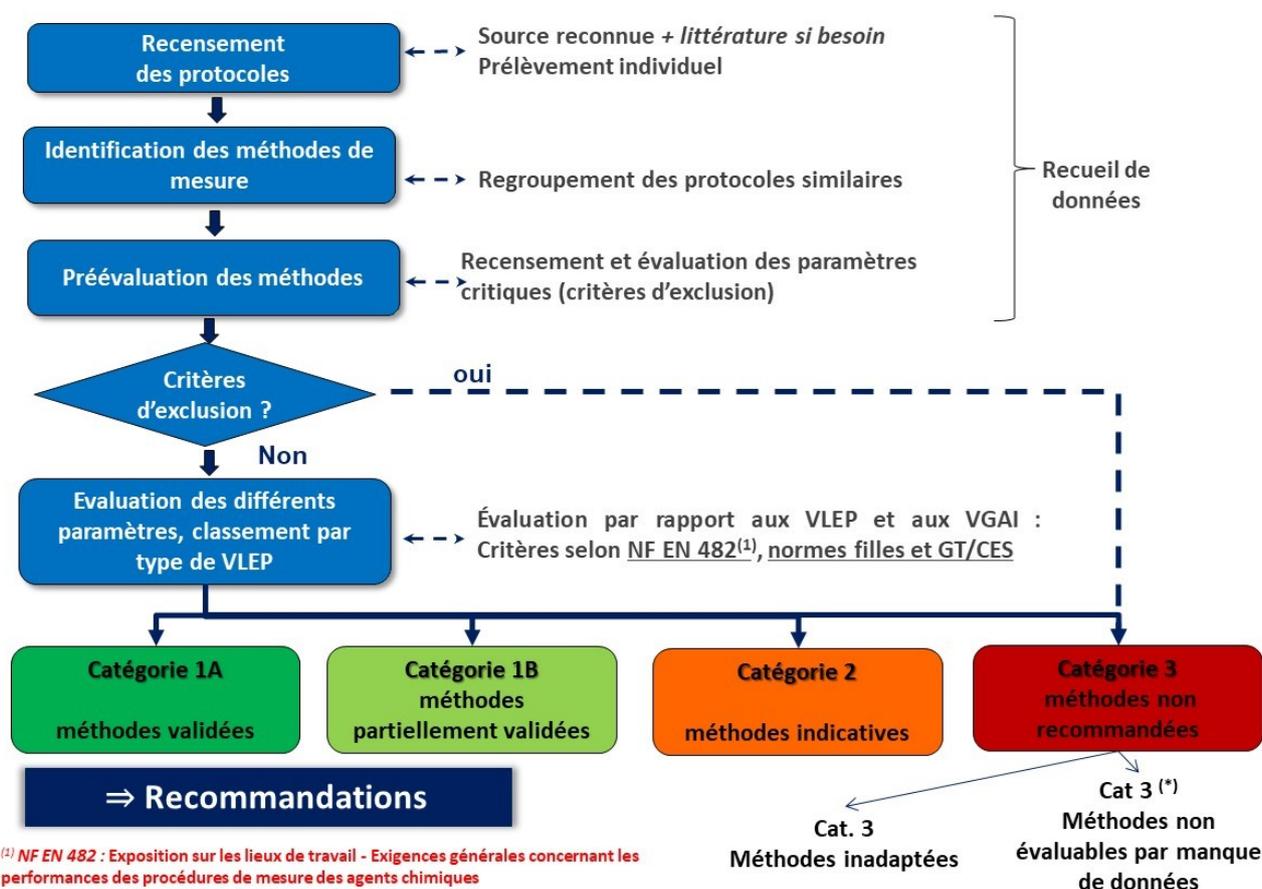


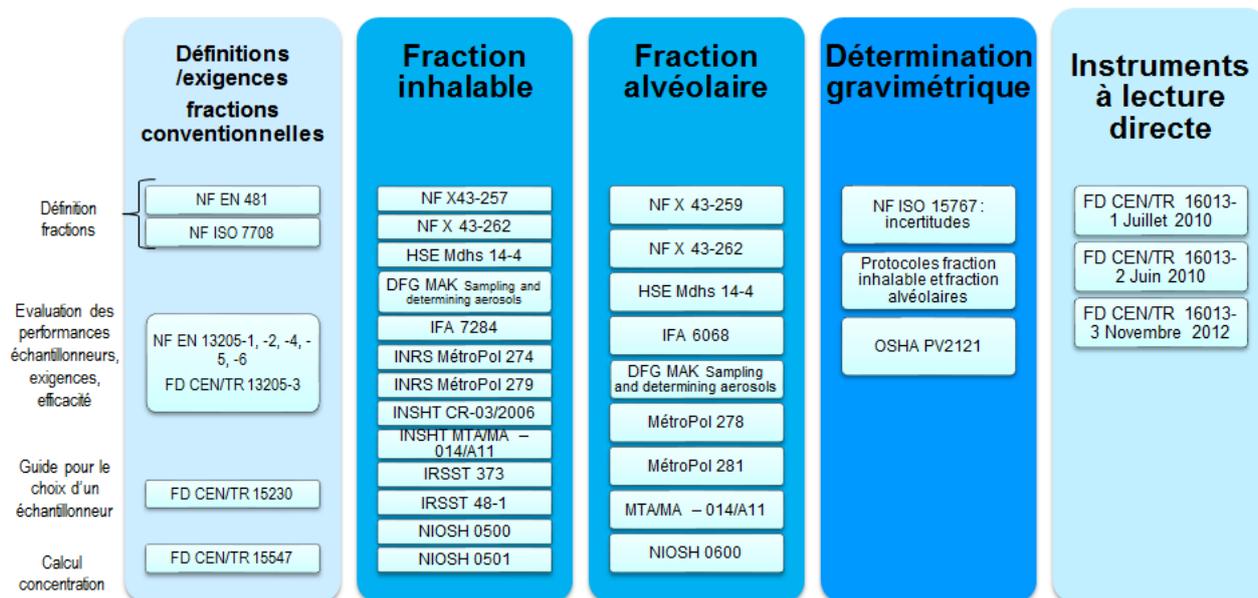
Figure 2 : Principe général (Anses, 2020)¹⁰

¹⁰ Le terme « normes filles » fait référence aux normes disponibles fixant des exigences complémentaires à celles de la norme NF EN 482 devant être satisfaites pour certains types particuliers de procédures et de dispositifs de mesurage

Le sigle GT de cette figure désigne spécifiquement le GT Métrologie en charge du travail d'évaluation des méthodes de mesure

4.1 Recensement des méthodes de mesure

La Figure 3 présente la typologie des protocoles en lien avec la mesure de la concentration en poussières sans effet spécifique (fraction inhalable et fraction alvéolaire) recensés.



(*) La norme NF X 43-257 ne décrit pas le prélèvement de la fraction inhalable, mais le prélèvement d'aérosols à l'aide d'une cassette d'orifice 4 mm. Toutefois la méthode décrite dans cette norme est utilisée dans de nombreux pays pour la détermination de la fraction inhalable des aérosols.

Figure 3 : Recensement des protocoles

Il existe différents appareils de mesure de particules à lecture directe basés sur différents principes : photométrie, comptage optique de particules. Ces dispositifs constituent une approche complémentaire à la méthode classique de prélèvement de la fraction granulométrique d'intérêt suivi d'une analyse gravimétrique. Ils sont intéressants car ils permettent un suivi des concentrations quasi instantané ainsi qu'un suivi des distributions granulométriques (FD CEN/TR 16013-1, -2, -3). Toutefois, ils présentent à ce jour des limitations qui ne permettent pas de les utiliser pour le contrôle du respect d'une VLEP réglementaire. Les avantages et inconvénients des photomètres et des compteurs optiques de particules sont mentionnés dans les normes FD CEN/TR 16013-1 à -3. Une étude de laboratoire (Thorpe, 2007), menée sur 5 appareils de mesure en continu, a démontré qu'ils sous-estimaient de manière importante la concentration en poussières inhalables en comparaison à des dispositifs classiques : IOM pour la fraction inhalable et Cyclone Higgins-Dewell dit SIMPEDS pour la fraction alvéolaire. Une étude plus récente (Görner *et al.*, 2012) avec un compteur de particules a montré que la mesure effectuée sur le terrain était proche des valeurs obtenues avec un CIP 10. Cette approche nécessite cependant des calculs complémentaires pour estimer l'exposition moyenne pour comparaison à une VLEP-8h. Ces appareils n'ont donc pas été évalués dans le cadre de cette expertise.

Les méthodes considérées mettent en œuvre un prélèvement d'air à l'aide d'un dispositif de prélèvement de la fraction inhalable ou bien de la fraction alvéolaire sur différents types de support. Le support fait ensuite l'objet d'une analyse gravimétrique.

Ces méthodes diffèrent donc essentiellement par le dispositif de prélèvement utilisé.

De nombreux dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable ou alvéolaire existent, et leur mise en œuvre est décrite au travers des différents protocoles recensés. Les exigences de performances

et modalités d'évaluation des performances de ces échantillonneurs sont décrites dans les normes NF EN 13205-1, -2, -4, -5, -6 et FD CEN TR 13205-3. La plupart des protocoles décrivant le prélèvement détaillent également les modalités de la détermination gravimétrique. La norme NF ISO 15767 fournit des recommandations pour le contrôle des incertitudes analytiques liées à l'instabilité des supports de collecte d'aérosols ainsi que les éléments connexes soumis à l'analyse par pesée.

L'échantillonneur capture la fraction d'intérêt de l'aérosol (inhalable, thoracique, alvéolaire) avec une certaine efficacité en fonction de la taille des particules.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des dispositifs de prélèvement des poussières mentionnés dans les protocoles recensés

| Dispositif | Fraction d'intérêt | Protocoles |
|------------------------------|--|---|
| Button | Inhalable | FD CEN/TR 15230 HSE MDHS 14-4 INHST CR 003 A06 INSHT MTA/MA 014/A11 |
| Cassette fermée 37 mm (CFC) | Inhalable Fraction totale (US-Canada) | INRS MétroPolM-274 + INRS MétroPol cassette fermée NIOSH 0500 IRSST 48-1 NF X43-257 |
| CFC et capsule interne | Inhalable | NIOSH 0501 |
| CIP 10-I | Inhalable | INRS MétroPol M-279 INRS MétroPol M-281 INRS MétroPol CIP 10 FD CEN/TR 15230 INHST CR-03/2006 INSHT MTA/MA 014/A11 |
| Flying Saucer 37 mm | Inhalable | OSHA PV 2121 |
| GSP-3,5 ¹¹ ou CIS | Inhalable | HSE MDHS 14/4 INHST CR-03/2006 INSHT MTA/MA 014/A11 FD CEN/TR 15230 BIA 7284 DFG MAK sampling aerosols |
| GSP-10 ¹² | inhalable | INSHT MTA/MA 014/A11 BIA 7284 FD CEN/TR 15230 |
| IOM | Inhalable | HSE MDHS 14/4 FD CEN/TR 15230 INHST CR-03/2006 INSHT MTA/MA 014/A11 IRSST MA-373 |
| PAS-6 | Inhalable | FD CEN/TR 15230 INHST CR 003 A06 INSHT MTA/MA 014/A11 |

¹¹ Parfois également noté PGP-GSP (FD CEN/TR 15230)

¹² Egalement noté PGP-GSP10 (FD CEN/TR 15230)

| Dispositif | Fraction d'intérêt | Protocoles |
|---|---------------------------------------|---|
| 7-hole (ou multi-orifice) | Inhalable | HSE MDHS 14/4 |
| Cyclones (Higgins-Dewell, Dorr-Oliver, GS-3, GK2.69) | Alvéolaire | HSE MDHS 14-4 NIOSH 0600 IFA 6068 DFG MAK sampling aerosols INRS MétroPolM-278 INSHT MTA/MA 014/A11 OSHA PV 2121 FD CEN/TR 15230 |
| Échantillonneurs haut débit (PGP10 ¹³ , cyclone BGI GK4.162, impacteur PPI8) | Alvéolaire | HSE MDHS 14-4 FD CEN/TR 15230 |
| CIS multi-fraction respirable | Inhalable Thoracique Alvéolaire | HSE MDHS 14/4 |
| IOM 'multidust' ou Dual fraction respirable | Inhalable Alvéolaire | FD CEN/TR 15230 HSE MDHS 14/4 INSHT MTA/MA 014/A11 |
| Perspec | Inhalable Alvéolaire thoracique | FD CEN/TR 15230 |
| Respicon | Inhalable Thoracique Alvéolaire | FD CEN/TR 15230 HSE MDHS 14/4 INSHT MTA/MA 014/A11 |
| Impacteurs en cascade | Distribution granulométrique | HSE MDHS 14-4 |

Les dispositifs de prélèvement à poste fixe ne permettant pas de faire des prélèvements individuels n'ont pas été recensés.

Le guide technique FD/CEN TR 15230 mentionne que les échantillonneurs listés en annexe B1 sont susceptibles de répondre aux exigences de la norme NF EN 481 dans certaines conditions environnementales. Le guide technique FD/CEN TR 15230 et le guide INSHT CR-03/2006 mentionnent qu'il n'existe toutefois aucun instrument d'échantillonnage répondant aux exigences dans toutes les conditions environnementales susceptibles d'être rencontrées sur les lieux de travail.

La norme NF EN 13205-1 liste les principaux facteurs qui influent sur l'efficacité de l'échantillonnage des échantillonneurs (Cf. § 4.2).

4.2 Remarques préalables sur l'évaluation des dispositifs de prélèvement

La méthodologie d'évaluation consiste à vérifier que les méthodes recensées satisfont aux exigences de la norme NF EN 482 et aux critères de décisions précisés dans le rapport « méthodologie » (Anses, 2020). Parmi ces critères, certains ne s'appliquent pas à la mesure de la concentration en PSES (détermination du débit d'échantillonnage pour les supports passifs, interférences, rendement d'adsorption/désorption). Pour la mesure des PSES, les principaux critères d'évaluation portent sur la conformité des préleveurs à la fraction conventionnelle inhalable

¹³ Egalement noté PGP-FSP10 (FD CEN/TR 15230)

ou alvéolaire, l'influence des conditions environnementales, la capacité de piégeage, les limites de quantification, l'étendue de mesure et les incertitudes.

C'est pourquoi, une analyse des performances des dispositifs décrits dans les protocoles recensés au regard des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire a été réalisée dans un premier temps.

La norme NF EN ISO 13205 définit les exigences à satisfaire pour les échantillonneurs d'aérosols, notamment des critères de performances relatifs au biais d'échantillonnage vis-à-vis des conventions et relatifs aux incertitudes. Le biais et les incertitudes sont influencés par de nombreux paramètres. La norme liste les principaux facteurs qui influent sur l'efficacité de l'échantillonnage des échantillonneurs (Cf. Tableau 6). Ces facteurs sont la distribution granulométrique totale (ou environnementale) des aérosols et la vitesse et la direction du vent. Pour certains types d'échantillonneurs, il est également important de tenir compte des variations du débit d'échantillonnage et des éléments de rétention qui sont utilisés pour recueillir les particules. Parmi les variables qui affectent le moins l'efficacité d'échantillonnage de l'échantillonneur figure la nature de l'aérosol (INSHT CR-03/2006).

D'autres paramètres peuvent également avoir une influence comme la température, la pression, l'humidité, les vibrations, les déplacements, l'orientation, le transport des échantillons et la sensibilité électromagnétique (FD/CEN TR 15230).

Tableau 6 : Principaux facteurs d'influence sur les performances des dispositifs de prélèvement d'aérosols (NF EN 13205-1)

| Facteur | Effet | Types de dispositifs de prélèvement concernés |
|---|--|--|
| Taille des particules | Sélection des particules en fonction de leur taille | Tous les types de dispositifs de prélèvement |
| Vitesse du vent | La vitesse du vent au niveau de l'orifice d'entrée influe sur l'aspiration, en particulier pour les vitesses du vent élevées et les grosses particules | Tout dispositif de prélèvement ne possédant pas d'orifice d'entrée isocinétique |
| Direction du vent | La direction du vent au niveau de l'orifice d'entrée influe sur l'aspiration | Tout dispositif de prélèvement ne possédant pas d'orifice d'entrée omnidirectionnel |
| Composition de l'aérosol | Rebonds et réentraînement des particules ; rupture des agglomérats | Par exemple, cyclones, impacteurs |
| Masse d'aérosol prélevée | L'efficacité de collecte et/ou la pénétration change(nt) lorsque les surfaces deviennent très chargées | Par exemple, impacteurs, cyclones, mousses poreuses |
| Charge électrique de l'aérosol | Attraction et répulsion par rapport aux surfaces | Tous les dispositifs de prélèvement, en particulier les dispositifs de prélèvement non conducteurs |
| Variabilité inter-spécimens (coefficient de variation de la masse collectée pour un groupe de spécimens exposés identiques) | Des petites différences de dimensions entraînent des effets aérodynamiques importants | Dispositifs de prélèvement à pénétration interne (par exemple, cyclones et impacteurs) |
| Variations de débit | Le mécanisme de séparation des particules dépend fortement du débit | Dispositifs de prélèvement à pénétration interne (par exemple, cyclones, élutriateurs et impacteurs) |
| Traitements de surface | L'efficacité de collecte dépend par exemple des graisses utilisées pour enduire les surfaces de collecte | Par exemple, impacteurs |

L'ensemble des informations ne sont pas disponibles dans les protocoles ou la littérature. Le biais global sur l'ensemble de la plage granulométrique d'intérêt n'est pas souvent renseigné, par contre il a été possible de calculer pour certains dispositifs de prélèvement des biais pour différentes tailles granulométriques (Cf. Annexe 2 et Annexe 3).

Pour évaluer les données disponibles une analyse qualitative du biais a donc été réalisée en considérant une valeur arbitraire $\pm 25\%$ pour juger les écarts à la courbe conventionnelle et classer les dispositifs de prélèvement sur la base d'études expérimentales en laboratoire.

L'influence des paramètres suivants a été discutée :

- Vitesse d'air : évaluation réalisée pour des vitesses d'air fréquemment rencontrés dans l'air des lieux de travail ($v < 0,5 \text{ m.s}^{-1}$) et description de l'influence de la vitesse d'air plus élevée sur l'efficacité d'échantillonnage
- Charge électrique de l'aérosol
- Dépôt sur les parois
- Orientation du dispositif

L'influence des paramètres suivants n'a pas été prise en compte, en raison d'un manque de données :

- Composition de l'aérosol
- Variabilité interspécimens
- Traitement de surface
- Variations de débits au cours des prélèvements (les débits sont fixés par les méthodes et les pompes sont à débit régulé).

Les limites de quantification, la capacité de piégeage et l'étendue de mesure ont ensuite été évaluées au travers des performances liées à la gravimétrie.

Ainsi lorsqu'il est possible de couvrir $0,1$ à $2 \cdot \text{VLEP-8h}$ avec 1 prélèvement de 8h, le critère relatif à la masse d'aérosol prélevée est coté 1A, lorsque 2 prélèvements de 4h sont nécessaires pour couvrir cette gamme, le critère est coté 1B, lorsqu'une optimisation de la LQ est nécessaire pour couvrir la gamme, le critère est coté 2 et lorsque la LQ ne permet pas d'atteindre $0,1 \cdot \text{VLEP-8h}$ alors le critère est coté 3.

A noter que les LQ prises en compte pour l'évaluation sont très dépendantes des conditions de pesée (lot, environnement, préparation des supports, etc...) et sont relativement anciennes. Ces limites devraient pouvoir être optimisées et, par conséquent, contribuer à améliorer le classement de ce critère.

Dans l'optique d'une démarche de prévention, le GT a favorisé la surestimation à la sous-estimation par rapport aux courbes conventionnelles.

4.3 Remarques préalables sur la gravimétrie

Les données générales ci-après sont issues de l'ensemble des protocoles des fractions inhalable et alvéolaire, des normes ISO 15767 et NF X 43-257 ainsi que du protocole OSHA PV2121 (Cf. Figure 3).

4.3.1 Remarques préalables et recommandations

Les principaux éléments décrits dans ces normes ainsi que quelques recommandations sont rappelés ci-après :

En matière **d'instabilité de pesées**, il convient d'être vigilant aux phénomènes suivants :

- adsorption d'humidité des supports (ainsi, à titre d'exemple, les filtres en fibres de quartz et les membranes PVC sont peu sensibles à l'humidité, ce qui n'est pas le cas des membranes en ester de cellulose) ;
- les effets électrostatiques étant une source fréquente de problèmes lors des pesées ; Il est recommandé de les minimiser par l'élimination des charges électriques du substrat, par l'emploi d'une source ionique à plasma (ou d'une source radioactive) ou par l'usage de matériaux conducteurs ;
- les effets dus aux composants volatils autres que l'eau qui peuvent être présents sur certains supports de collecte inutilisés ou introduits par adsorption sur le support lors du prélèvement. Ces effets peuvent être compensés en choisissant le support adapté, soit par un traitement préalable du support ou par l'utilisation de blancs ;
- la détérioration due aux manipulations : supports friables, utilisation de pinces, conditionnement, contaminations, transport, etc.

Ces effets peuvent être corrigés lors de la procédure mise en place pour la pesée, voici les recommandations en matière de corrections à appliquer :

- effectuer au moins un blanc de terrain tous les 10 échantillons¹⁴ ;
- les blancs doivent être intercalés pendant les séquences de pesées ;
- les corrections doivent tenir compte :
 - ✓ du conditionnement des supports,
 - ✓ des conditions d'entreposage (notamment le stockage avant utilisation).

Les **mesures** doivent être effectuées :

- sur une balance de précision de 5 à 6 chiffres pour l'air des lieux de travail, hors vibration ;,
- des contrôles environnementaux sont recommandés notamment en matière de stabilité de la température et de l'humidité relative, de la filtration de l'air ou encore de la ventilation.

Des éléments complémentaires sont apportés en Annexe B « Détermination par gravimétrie de la masse d'aérosol prélevée » (informative) de la norme NF X 43-257 à savoir :

- débarrasser, si nécessaire avant utilisation, les filtres des éventuelles bavures ou résidus provenant de leur fabrication, par un léger brossage au pinceau ;
- traiter, par un lavage approprié avec un tensioactif, les membranes en PVC afin d'éliminer les charges électrostatiques (protocole détaillé décrit dans la norme) ;
- conditionner les filtres (en fibre de quartz, fibre de verre, membranes) avant la pesée par un séjour suffisant pour assurer la stabilisation (en général au moins 12 heures) dans le local de pesée, ceux-ci se trouvant soit déjà dans les cassettes, soit dans des boîtes de Pétri propres. Dans les deux cas, les contenants sont entrouverts pour permettre l'établissement d'un équilibre avec l'atmosphère.

¹⁴ le blanc de terrain est désigné comme étant un « substrat à blanc soumis aux mêmes manipulations que le substrat de prélèvement, incluant généralement une phase de conditionnement et nécessitant souvent une mise en place dans les échantillonneurs ou récipients de transport, ainsi que l'acheminement entre le laboratoire et le site de prélèvement, mais sans être soumis au prélèvement ». Ce blanc de terrain ne doit pas être confondu avec le blanc de laboratoire qui est un « substrat à blanc soumis aux mêmes manipulations de laboratoire que le substrat de prélèvement, incluant une phase de conditionnement et une mise en place dans les échantillonneurs ou récipients de transport, si ces opérations sont effectuées en laboratoire ».

Cette norme préconise également que, pour chaque série d'une dizaine de filtres utilisés pour le prélèvement, utiliser deux ou trois filtres de blancs de terrain, qui doivent être traités exactement de la même manière que les filtres utilisés pour le prélèvement, avant et après prélèvement. Le blanc témoin étant une « cassette munie de son filtre, qui a été emportée sur le site de prélèvement, mais n'a pas été utilisée pour le prélèvement. La cassette est restée bouchée. ». Il est par ailleurs précisé que « d'une façon générale, l'utilisation de blancs de terrain dont les filtres (et les cassettes, dans le cas de l'analyse de la fraction captée) sont issus du même lot que les filtres (et cassettes) utilisés pour le prélèvement, est indispensable pour procéder aux corrections nécessaires. »

Enfin il est également mentionné (§ 5.2) que « La perméance du filtre, mesurée selon la norme NF X 44-013¹⁵ à la vitesse frontale d'utilisation, doit être inférieure à 0,1 % ».

4.3.2 Recueil des limites de détection et de quantification des supports

Le recueil des limites de détection et de quantification des supports est basé sur les données issues de l'ensemble des protocoles recensés des fractions inhalable et alvéolaire ainsi que sur le protocole OSHA PV2121 qui est un protocole spécifique à l'analyse gravimétrique (sur support PVC 37 mm).

Les références des supports mentionnés dans les normes ISO 15767 et NF X43-257 qui entrent également dans le champ de ce recueil sont relativement anciennes. Il est probable que la nature des supports et leurs caractéristiques (composition, mode de synthèse des membranes) aient évoluées depuis ; il en est de même pour les protocoles détaillés ci-après.

De plus, et d'une manière générale, les limites de quantification et de détection mentionnées ci-après sont des ordres de grandeur dans la mesure où ces valeurs sont, pour un même support, non seulement dépendantes des critères décrits en 4.3.1 (conditions environnementales, sensibilité de la balance, etc.) mais également de la durée de l'échantillonnage, des fournisseurs de supports voire des lots utilisés. Pour certains supports peu de données sont disponibles, notamment pour les cassettes IOM avec une seule occurrence pour la cassette IOM plastique support PVC, la cassette IOM acier support en fibres de quartz et la cassette IOM plastique support en fibres de quartz.

Ces facteurs doivent donc être choisis afin d'assurer des performances (LD / LQ) suffisantes au regard des valeurs limites proposées.

Périmètre de l'expertise :

Les diamètres des supports les plus utilisés pour les prélèvements des fractions inhalable et alvéolaire sont les diamètres 37 et 25 mm. Seuls ces deux diamètres ont donc été répertoriés. En revanche, l'ensemble des porosités ont été prises en compte.

Les supports les plus couramment rencontrés en prélèvement de l'air des lieux de travail sont :

- les filtres en fibres de quartz ou en fibres de verre (filtre en profondeur),
- les membranes en acétate ou en mélanges d'esters de cellulose (EC),
- les membranes en PVC ou en PTFE (Teflon®).

Les membranes en PTFE ont été écartées de cette expertise car très sensible aux charges électrostatiques (DFG MAK sampling aerosols). Par ailleurs, ce type de membrane est insoluble, ce qui peut être problématique lorsque l'analyse des poussières prélevées nécessite une dissolution du support.

- les coupelles pour CIP10 (mousse en polyuréthane) ;
- les cassettes IOM ;
- les capsules soudées à une membrane.

¹⁵AFNOR NF X 44-013 : Février 1983 : Séparateurs aérauliques - Méthode d'essai des filtres à l'aérosol de chlorure de sodium par photométrie de flamme – Norme Annulée le 12/04/2017

Ces dernières peuvent être de composition variée (entièrement en ester de cellulose, entièrement en PVC ou avec une capsule en PVC et une membrane en ester de cellulose).

Concernant les capsules soudées à une membrane, peu de données relatives à la gravimétrie sont disponibles dans les protocoles recensés. Afin de compléter ces informations, une recherche dans la littérature a été réalisée. La requête suivante a été formulée sur SCOPUS le 20 mars 2018 :

- TITLE-ABS-KEY (accu-cap) / accu-cap[All Fields]
- (TITLE-ABS-KEY (capsule*) AND TITLE-ABS-KEY (internal) AND TITLE-ABS-KEY (sampler))
- (TITLE-ABS-KEY (internal) AND TITLE-ABS-KEY (capsule*) AND TITLE-ABS-KEY (cassette) AND TITLE-ABS-KEY (sampl*))
- [All: "internal" and "capsule*"] AND [in Journal: Journal of Occupational and Environmental Hygiene] AND [Publication Date: (01/01/2000 TO *)]

Cette requête a permis d'identifier 12 articles. Après tri sur titre et résumé, 2 articles ont été retenus comme apportant des éléments complémentaires en termes de limites de détection/quantification à savoir : O'Connor *et al.*, 2014 et Champmartin *et al.*, 2014.

L'annexe 1 synthétise les principales limites de détection obtenues pour les supports couramment utilisés lors des prélèvements des fractions inhalable et alvéolaire.

Les protocoles qui présentent des données à ce sujet sont les suivants : DFG MAK sampling aerosols, INSHT MTA/MA-014/A11, IRSST 48-1IRSST MA-373, OSHA PV 2121, NIOSH 0500, NIOSH 0600, MétroPol M-274, MétroPol M-278, MétroPol M-279, MétroPol M-281.

Dans ces documents, les informations concernant les caractéristiques des membranes ne sont pas toujours mentionnées (diamètre et porosité notamment) ; lorsque ces informations sont connues, elles sont reportées dans le tableau.

Les limites de quantification (LQ), ici reportées, s'affranchissent du débit du dispositif de prélèvement et sont données en $\mu\text{g}/\text{échantillon}$. Si les données de quantification ne sont pas mentionnées, elles sont déterminées à partir des limites de détection (LD) et sont représentées en italique.

Des informations complémentaires sont données entre parenthèses et concernent la porosité (PS en μm), l'incertitude élargie (U), le coefficient de rétention (R en $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$). La rétention maximale R est mentionnée dans les protocoles MétroPol M-274 et M-278 pour quelques supports et est explicitée ci-après.

Concernant les données relatives à l'IOM avec prélèvement en cassette et support en PVC, parmi les publications analysées (Harper et Muller, 2002, Kenny, Aitken, *et al.*, 1997, Bartley, 1998, Aizenberg, England, *et al.*, 2000, Görner *et al.*, 2010, de Vocht *et al.*, 2006, Brixey *et al.*, 2005, Kerr *et al.*, 2002, Li *et al.*, 2002, Li *et al.*, 1999, Paik *et al.*, 2004), seules les publications Kerr *et al.*, 2002 et Li *et al.*, 1999 présentent des données en terme d'analyses gravimétriques. Kerr *et al.*, 2002 mentionnent une LD de l'ensemble de la procédure analytique de 0,1 mg (soit une LQ de 333 μg) et Li *et al.*, 1999 présentent des variations d'analyses gravimétriques d'échantillons prélevés mais pas de LD en tant que telles.

Ces données sont extrapolées dans la suite du rapport de manière spécifique, en prenant en compte les débits des dispositifs de prélèvement et les VLEP recommandées pour la fraction inhalable (Cf. § 4.4.2) puis, pour la fraction alvéolaire (Cf. § 4.5.2).

Considérant que ces valeurs ne sont données qu'à titre d'ordre de grandeur, la gamme de ces limites de quantification (plus faible - plus élevée) est précisée lorsque plusieurs valeurs sont disponibles.

À noter que, pour les valeurs retenues pour les capsules internes, l'affectation des LQ pour les capsules munies de membranes en PVC et/ou ester de cellulose n'est pas mentionnée dans l'étude

de Champmartin *et al.* de 2014 mais il est très probable que les meilleures LQ soient obtenues pour les capsules munies de membranes en PVC.

Les valeurs retenues pour le calcul ultérieur des limites de quantification des fractions inhalable et alvéolaire (Cf. § 4.4.2 et § 4.5.2 respectivement) sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Récapitulatif des limites de quantification retenues pour chaque support de prélèvement (en µg)

| Support | Caractéristique | LQ retenues | |
|---------------------|--------------------------|----------------|----------------|
| | | valeurs basses | valeurs hautes |
| PVC | Ø25 | 25 | 100 |
| | Ø37 | 17 | 333 |
| | capsule int. Ø37 | 150 | 377 |
| | cass IOM inox + Ø25 | 40 | 333 |
| EC | Ø25 | - | - |
| | Ø37 | 500 | 1000 |
| | capsule int. Ø37 | 150 | 377 |
| Fibres de verre | Ø25 | 57 | 400 |
| | Ø37 | 30 | 1000 |
| | cass IOM plastique + Ø25 | | 92 |
| | cass IOM acier+ Ø25 | | 64 |
| Filtre quartz | Ø25 | - | - |
| | Ø37 | 30 | 333 |
| Mousse Polyuréthane | coupelle CIP 10 | 463 | 3330 |

Dans les protocoles MétroPol, il est mentionné que « *R désigne la densité surfacique de matière collectée sur un filtre, qu'il est recommandé de ne pas dépasser si l'on veut limiter les pertes de matière par choc, pendant le transport par exemple. Ces valeurs correspondent à un dépôt relativement homogène. Elles peuvent être dépassées si les filtres sont manipulés avec beaucoup de précautions ou s'ils sont placés dans des capsules ou cassettes internes ; cependant leur colmatage progressif peut devenir alors un phénomène limitatif* ».

Le protocole NIOSH 0600 mentionne qu'il ne faut pas plus de **2 mg** de poussières sur un support PVC, ce qui correspond à environ 0,23 mg.cm⁻² pour un support de 37 mm (8,7 cm² avec un diamètre effectif de collecte de 33,3 mm soit 10 % du diamètre de la membrane) ou à 0,5 mg.cm⁻² pour un support 25 mm (4,0 cm² avec un diamètre effectif de collecte de 22,5 mm).

Dans les protocoles MétroPol M-274 et M-278, pour un même support PVC, il est recommandé de ne pas dépasser R=1.

Le calcul inverse permet donc d'estimer, sur la base des éléments donnés dans les protocoles MétroPol, la masse maximale approximative pouvant être déposée sur les supports en fonction de leur nature et de leur taille (Cf. Tableau 8).

Tableau 8: Récapitulatif des limites de charge (en mg) en fonction des supports et de R

| Supports | Caractéristiques | R (mg/cm ²) selon MétroPol | Charge maximale calculée (*) (mg) |
|----------|------------------|--|-----------------------------------|
| PVC | Ø25 | 1 | 4 |
| | Ø37 | 1 | 8,7 |
| EC | Ø25 | 1 | 4 |
| | Ø37 | 1 | 8,7 |
| | capsule int. Ø37 | >>1 | >> 8,7 |

| | | | |
|--|-----|---|------|
| Fibres de verre ou de quartz | Ø25 | 3 | 11,9 |
| | Ø37 | 3 | 26,1 |
| Mousse PU / CIP 10 | | | 65 |
| (*) : sauf pour mousse PU / CIP 10 (valeur déterminée expérimentalement) | | | |

Enfin, s'agissant des pertes de charge inhérentes à un prélèvement de matière important, les pompes individuelles actuellement mises sur le marché peuvent, sans aucun problème particulier, gérer des charges importantes sans nuire à la stabilité du débit pendant les 8 heures de prélèvement.

4.4 Évaluation détaillée des méthodes de mesure de la fraction inhalable des PSES dans l'air des lieux de travail

L'évaluation des méthodes de mesure a été réalisée au regard de la VLEP recommandée par le CES.

Exigences : Compte tenu de la VLEP-8h proposée, les méthodes doivent être validées sur l'intervalle de concentrations suivant :

- 0,1 à 2 *VLEP-8h : 0,4 – 8 mg.m⁻³ pour le contrôle technique réglementaire de la VLEP-8h

4.4.1 Efficacité d'échantillonnage des échantillonneurs individuels de la fraction inhalable

La spécification cible pour l'échantillonnage de la fraction inhalable est donnée dans les normes NF EN 481 (1993) et NF ISO 7708 (1996) et correspond à une efficacité de collecte de 100 % pour les petites particules (< ≈ 2 µm), efficacité qui chute à 50% pour les particules de 100 µm. Les particules au-delà de 100 µm ne sont pas prises en compte dans la définition de la fraction inhalable.

Un échantillonneur de la fraction inhalable est considéré comme idéal « *lorsqu'un échantillonneur personnel monté sur le travailleur donne la même concentration de poussière mesurée et la même distribution aérodynamique que celle inspirée par le travailleur, indépendamment de l'emplacement de la source de poussière et des conditions de vent* » (Mark et Vincent, 1986).

Cette convention est définie pour des vitesses d'air < 4 m.s⁻¹ (NF EN 481, NF ISO 7708).

L'Annexe 1 présente les données relatives aux différents échantillonneurs disponibles dans les différents protocoles.

Afin de compléter les informations relatives à l'efficacité des échantillonneurs vis-à-vis de la fraction inhalable, une recherche dans la littérature a été réalisée. La requête suivante a été formulée sur SCOPUS le 12 décembre 2017 :

- TITLE-ABS-KEY (aerosol AND sampler AND inhalable AND occupational)

Un tri a été réalisé sur titre et résumé, puis une analyse critique à partir du texte intégral, ce qui a permis **d'identifier des études complémentaires et de décrire les performances des échantillonneurs sur la base de 28 articles.**

L'évaluation des performances des échantillonneurs vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable a été réalisée à partir de l'ensemble de ces données (protocoles + littérature) en s'attachant à évaluer et analyser le biais de chaque préleveur vis-à-vis de la courbe conventionnelle.

La fraction conventionnelle inhalable a été déterminée pour des vitesses d'air relativement élevées (jusqu'à 4 m.s^{-1}). Les vitesses d'air actuellement rencontrées sur les lieux de travail en intérieur étant nettement inférieures, généralement inférieures à $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ (Baldwin *et al.*, 1998), plusieurs auteurs se sont attachés à définir une inhalabilité en air calme (Aitken *et al.*, 1999, Sleeth *et al.*, 2011). Toutefois, cette inhalabilité en air calme n'a pas fait l'objet d'une convention et n'est actuellement pas normalisée. De ce fait, les différents dispositifs de prélèvement n'ont été évalués qu'au regard de la fraction inhalable conventionnelle, et ce quelle que soit la vitesse d'air à laquelle ils ont été testés.

L'analyse des données relatives aux échantillonneurs disponibles dans les différents protocoles et ayant fait l'objet de publications concernant des études expérimentales ou de terrain, ayant pour objectif de qualifier l'efficacité de captage de chaque dispositif, en comparaison à la fraction conventionnelle, sont présentés dans les paragraphes suivants.

4.4.1.1 Description et performance du dispositif CIP 10-I vis-à-vis de la convention inhalable

Ce dispositif de prélèvement à coupelle tournante collecte les poussières sur un disque en mousse polyuréthane contenu dans une coupelle en plastique. L'étage de collecte est précédé d'un sélecteur de particules dont le rôle est de trier les particules en fonction de leur diamètre aérodynamique et collecter la fraction inhalable.

Deux versions du CIP 10-I ont été développées. La première version (CIP 10-I v1) induisait des pertes de particules par dépôt au niveau des parois intérieures. La seconde version (CIP 10-I v2) plus récente inclut une fente d'aspiration annulaire horizontale pour limiter ces pertes (Görner *et al.*, 2010).

Les guides établis pour l'échantillonnage de la fraction inhalable (FD CEN/TR 15230, INSHT CR-03/2006) le citent comme exemple de préleveur de la fraction inhalable sur la base des études démontrant sa capacité à prélever cette fraction conventionnelle. Sa mise en œuvre est détaillée dans le protocole INRS MétroPol M 279 et ses performances sont détaillées dans la fiche INRS MétroPol CIP10.

L'efficacité de prélèvement de ce dispositif au regard de la convention inhalable a été étudiée en laboratoire, en tunnel aérodynamique en atmosphère contrôlée (vitesse du vent, stabilité de la concentration en poussières, distribution granulométrique...) (Kenny, Aitken, *et al.*, 1997, Görner *et al.*, 2009, Görner *et al.*, 2010 détaillées en annexe 2.

Kenny, Aitken, *et al.*, 1997 ont testé la première version du CIP 10-I, dans un tunnel sur un mannequin en rotation à 3 vitesses d'air : 4, 1 et $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. L'aérosol d'essai est un aérosol mono-dispersé d'oxyde d'aluminium, 9 tailles de 7 à $100 \mu\text{m}$. Les concentrations testées étaient d'environ $200\text{-}300 \text{ mg.m}^{-3}$.

A $0,5$ et 1 m.s^{-1} , le CIP -10 v1 sous-estime la fraction inhalable pour la plupart des tailles de particules testées : les écarts à la convention varient de -22 à -80% à 1 m.s^{-1} et de 7 à -76% à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Cette sous-estimation est confirmée par Görner *et al.*, 2010. A vitesse d'air plus élevée (4 m.s^{-1}), le dispositif sous-estime la fraction inhalable jusqu'à environ $30 \mu\text{m}$, puis surestime largement cette fraction (écart de 112 à 135% pour les particules de taille de 55 à $100 \mu\text{m}$).

La version 2 du CIP 10-I a été évaluée par Görner *et al.* 2009 et 2010. En air calme, ce dispositif sous-estime la fraction conventionnelle (écart global de -22%, Cf. Annexe 2), et à 1 m.s^{-1} , l'écart à la convention est relativement faible (+ 1,9%). Une carte de biais a été établie à partir des essais dans un tunnel aérodynamique (vitesse d'air de 1 m.s^{-1}) à l'aide d'un aérosol polydispersé de billes de verre de MMAD (Mass Median Aerodynamic Diameter) 1 à $25 \mu\text{m}$ (par pas de $1 \mu\text{m}$) et d'écart type géométrique de 1,5 à 3,5 (pas de 0,25). Dans ces conditions, le biais du CIP 10-I v2 vis-à-vis de la convention inhalable est compris entre -10 et + 10% dans 81% des cas. Le biais le plus important est compris entre + 10 et + 20% pour : les tailles de particules suivantes : MMAD = $5 \mu\text{m}$ et $\text{GSD} \leq 2$; $6 \leq \text{MMAD} < 12 \mu\text{m}$ et $\text{GSD} \leq 2,25$; $12 \leq \text{MMAD} < 15 \mu\text{m}$ et $\text{GSD} \leq 2$; $15 \leq \text{MMAD} < 18 \mu\text{m}$ et $\text{GSD} \leq 1,75$; $18 \leq \text{MMAD} < 22 \mu\text{m}$ et $\text{GSD} = 1,50$ (Görner *et al.*, 2009).

D'après les deux études de mesure de l'efficacité de prélèvement au regard de la fraction conventionnelle inhalable du CIP 10-I V2, cet échantillonneur permet de prélever une fraction proche de la fraction conventionnelle aux vitesses d'air testées (0,5 et 1 m.s⁻¹).

4.4.1.2 Description et performance du dispositif IOM vis-à-vis de la convention inhalable

La tête d'échantillonnage de l'IOM est conçue pour recueillir les particules inhalables pour un accord optimal avec la Convention CEN / ISO lorsqu'elle est utilisée à 2,0 L.min⁻¹ (HSE MDHS 14/4).

L'échantillonneur a une entrée circulaire de 15 mm avec une lèvre en saillie de 1,5 mm vers l'extérieur de manière à minimiser le prélèvement des particules déposées sur les surfaces externes du dispositif. La cassette IOM incorpore un filtre de 25 mm. Le filtre et la cassette doivent être pesés simultanément pour prendre en compte les dépôts sur les parois (IOM Guidance).

Il existe plusieurs versions du préleveur IOM, notamment l'une avec une cassette en plastique conducteur et l'autre en acier inoxydable. Le caractère hygroscopique des cassettes en matière plastique peut générer une erreur significative (Li *et al.*, 1999). Ce dispositif a fait l'objet de plusieurs modifications au fil du temps. Les études ne précisent pas la version de l'IOM évaluée (acier ou plastique). Il existe également une version modifiée appelée IOM Dual Sampler ou IOM multi-dust intégrant une mousse pour la mesure conjointe des fractions alvéolaire et inhalable. Cet échantillonneur multi-fractions fait l'objet d'une description et d'une évaluation spécifiques au § 4.6.

L'IOM est recommandé par la norme FD CEN/TR 15230, les guides HSE MDHS 14-4, INHST CR-03/2006, les protocoles IRSST MA-373 et INSHT MTA/MA-014/A11. Le protocole HSE MDHS 14-4 recommande l'utilisation du préleveur IOM compte tenu des nombreux essais de validation réalisés tant sur le terrain qu'en laboratoire et préconise l'utilisation de cassettes métalliques car moins sensibles à l'humidité et plus stables à la pesée.

Le guide INHST CR-03/2006 précise que les particules supérieures à 70 µm sont sur-échantillonnées par rapport à la courbe conventionnelle en raison de la projection possible, via l'ouverture de l'échantillonneur, de grosses particules émises dans certains procédés (Harper et Muller, 2002). Il précise également que l'échantillonnage à l'aide de l'IOM est sensible à la direction du vent.

L'IOM a fait l'objet de nombreuses études en tunnel aérodynamique en atmosphère contrôlée pour évaluer son efficacité de prélèvement au regard de la fraction inhalable (Kenny et Gussman, 1997, Kenny *et al.*, 1999, Li *et al.*, 2000, Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000a, Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b, Aizenberg *et al.*, 2001, Paik *et al.*, 2004, Witschger *et al.*, 2004, Görner *et al.*, 2009, Görner *et al.*, 2010, Sleeth *et al.*, 2012). La version de l'IOM évaluée dans ces études n'est pas toujours renseignée et n'a pas été prise en compte dans l'évaluation.

L'ensemble de ces études mettent en évidence un sur-échantillonnage des particules les plus grosses. L'écart à la convention inhalable augmente avec le diamètre des particules et ce biais devient très important à des vitesses d'air élevées, notamment lorsque l'IOM est orienté face au flux d'air.

L'étude de Kenny *et al.* (1997), réalisée en tunnel sur mannequin tournant, montre qu'à 0,5 m.s⁻¹ l'IOM surestime la fraction inhalable pour toutes les tailles de particules testées (7 à 100 µm) et que cette surestimation est plus importante pour les particules de tailles supérieures à 70 µm. Dans cette étude, plus la vitesse d'air augmente (1 et 4 m.s⁻¹) et plus l'IOM a tendance à sous-estimer la fraction conventionnelle, hormis pour les particules de taille supérieure à 70 µm où un sur-échantillonnage est toujours observé.

Une étude, réalisée en tunnel avec deux vitesses d'air (0,55 et 1 m.s⁻¹) et un aérosol de particules solides monodispersées avec des diamètres aérodynamiques allant de 5 à 68 µm, montre un sur-

échantillonnage des particules de Dae supérieurs à 10 µm lorsque l'IOM est orienté face au flux d'air (orientation de 0°) d'une part et une sous-estimation de ces particules lorsqu'il est orienté perpendiculairement ou à l'opposé du flux d'air (respectivement 90° et 180°) d'autre part (Li *et al.*, 2000). Cette sensibilité de l'IOM à l'orientation du flux d'air est confirmée par l'étude de Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000a montrant une baisse notable de l'efficacité de collecte des particules de 70 µm lorsque l'IOM est positionné avec une orientation de 90° par rapport au flux d'air.

Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000a dans une étude en chambre sur mannequin positionné selon différentes orientations (0°, 90°, 180°, 270°), montrent qu'à des vitesses d'air de 0,5 m.s⁻¹, l'efficacité moyenne de prélèvement (moyenne selon les orientations) de IOM est très proche de la courbe conventionnelle inhalable (biais allant de -8 à +4% pour les 3 tailles de particules testées (7, 29 et 70 µm). Par contre à 2 m.s⁻¹, l'IOM sous-échantillonne les particules de diamètre inférieur à 70 µm et sur-échantillonne les particules de 70 µm.

En air calme ($\leq 0,55$ m.s⁻¹), en considérant une orientation face au flux d'air ou bien une orientation moyennée (mannequin tournant), la tête d'échantillonnage de l'IOM a tendance à sur-échantillonner les particules de grosse taille (~60 à 100 µm) (Kenny, Aitken, *et al.*, 1997, Kenny *et al.*, 1999, Li *et al.*, 2000, Görner *et al.*, 2010, Sleeth *et al.*, 2012 ; Witschger *et al.*, 2004). Kenny *et al.* en 1999, Witschger *et al.* en 2004 et Sleeth *et al.*, 2012 montrent que l'efficacité de l'IOM augmente lorsque la vitesse d'air diminue de 0,42 à des vitesses inférieures à 0,1 m.s⁻¹.

À des vitesses d'air élevées ($> 4,0$ m.s⁻¹), les particules sont plus facilement déposées sur les parois de la cassette (Kenny, Aitken, *et al.*, 1997).

Les résultats de ces différentes études et les guides FD/CEN TR 15230 et INSHT CR-03/006 qualifient l'IOM comme dispositif permettant de prélever une fraction proche de la fraction inhalable conventionnelle.

De nombreuses études de terrain visant à comparer l'efficacité de prélèvement de différents préleveurs avec celle de l'IOM ont également été réalisées, mais ne permettent pas d'apprécier l'écart vis-à-vis de la convention inhalable (Cf. §4.4.1.12).

La majorité des études, réalisées dans des conditions variables de vitesse d'air (<0,5 à 4 m.s⁻¹), mettent en évidence que l'IOM a tendance à surestimer la fraction conventionnelle inhalable, quelles que soient les conditions environnantes. Cette surestimation, pour des vitesses d'air d'environ 0,5 m.s⁻¹ ; est surtout présente au-delà de 70 µm. A vitesse d'air plus élevée (> 1 m.s⁻¹), l'IOM peut sous-estimer la fraction conventionnelle. Il est sensible à la vitesse d'air d'une part et à l'orientation d'autre part. Il est à noter que la version de l'IOM utilisée dans ces études n'est pas toujours renseignée et n'a pas été prise en compte dans cette évaluation.

4.4.1.3 Description et performance du dispositif GSP ou CIS vis-à-vis de la convention inhalable

Le GSP (*Gesamtstaub-Probenahmesystem*) ou CIS (*Conical Inhalable Sampler*) est mentionné par la norme FD CEN/TR 15230, les guides HSE MDHS 14-4, INHST CR-03/2006, DFG MAK « *Sampling and determining aerosols and their chemical components* » et les protocoles BIA 7284 et INSHT MTA/MA-014/A11. Dans ce dispositif, l'air est prélevé à un débit de 3,5 L.min⁻¹, sur un filtre en fibre de verre de 37 mm de diamètre au travers d'un orifice de 8mm de diamètre. Ce dispositif existe en métal ou en plastique.

Il existe une version du GSP fonctionnant à 10 L.min⁻¹ (GSP-10), avec une ouverture de 12 mm et utilisant des filtres en fibres de verre de diamètre 37 mm permettant d'abaisser les limites de quantification grâce à un volume d'air prélevé plus important.

Le dispositif GSP-3.5 à 3,5 L.min⁻¹ a fait l'objet d'études de laboratoires en tunnel aérodynamique afin d'évaluer sa capacité à prélever une fraction proche de la fraction inhalable (Kenny, Aitken, *et al.*, 1997; Woehkenberg *et al.*, 1998, Kenny *et al.*, 1999, Li *et al.*, 2000, Aizenberg, England, *et al.*, 2000; Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b, Aizenberg *et al.*, 2001, Sleeth *et al.*, 2012).

Ces études montrent que le GSP-3.5, à des vitesses d'air supérieures ou égales à 1 m.s⁻¹ sous-estime la fraction inhalable (Kenny, Aitken, *et al.*, 1997, Li *et al.*, 2000, Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000a, Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b, Cf. annexe 2.6). Pour des vitesses d'air plus faibles (~ 0,5 m.s⁻¹), cette sous-estimation est moindre (Kenny, Aitken, *et al.*, 1997, Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b) et certaines études mettent en évidence une surestimation à des vitesses d'air très faibles (de l'ordre de 0,1 m.s⁻¹, Sleeth *et al.*, 2012). Pour des vitesses d'air inférieures à 0,05 m.s⁻¹, le GSP 3,5 surestime la fraction conventionnelle jusqu'à des tailles d'environ 70 µm puis, pour des particules plus grosses, la sous-estime (Kenny *et al.*, 1999).

L'étude de Li *et al.*, 2000 souligne que le GSP-3.5 est sensible à l'orientation : positionné face au flux d'air, un sous-échantillonnage est observé à partir d'une taille de particules comprise entre 40 et 68 µm aux deux vitesses d'air testées (0,55 et 1 m.s⁻¹). Dans le même temps, il est observé une perte de particules sur les parois de l'ordre de 30% à 40 µm allant jusqu'à plus de 60% à 68 µm. Lorsqu'il est positionné perpendiculairement au flux d'air ou bien dos au flux d'air, ces pertes sur les parois sont négligeables mais il est toujours observé un sous-échantillonnage à partir d'une taille de particule comprise entre 40 et 68 µm aux deux vitesses d'air testées.

Le GSP-3.5, dans des conditions de vitesses d'air proches de celles rencontrées sur les lieux de travail, sous-estime la fraction conventionnelle à partir d'environ 40-50 µm. Plus la vitesse d'air est faible et plus l'efficacité de prélèvement du GSP-3.5 augmente avec pour conséquence un sur-échantillonnage pour les particules de taille inférieure ou égale à environ 70 µm pour des vitesses d'air inférieures ou égales à 0,2 m.s⁻¹. A des vitesses d'air supérieures ou égales à 1 m.s⁻¹, l'efficacité de prélèvement du GSP-3.5 augmente ou diminue selon l'orientation (face au flux d'air ou moyennée). Le dépôt sur les parois peut être important pour les particules de plus gros diamètre.

Aucune des études recensées ne présente de données relatives à l'efficacité de prélèvement du GSP-10 au regard de la fraction conventionnelle inhalable.

4.4.1.4 Description et performance du dispositif Cassette fermée 37 mm CFC vis-à-vis de la convention inhalable

La cassette fermée (CFC pour *Closed Face Cassette* en anglais) est un dispositif porte filtre de diamètre 37 mm constitué de 3 pièces en plastique muni d'une ouverture de 4 mm. La nature de filtre est dépendant du type d'analyse ultérieure à réaliser et peut nécessiter l'utilisation d'un tampon support en fibre de cellulose. Il existe également des cassettes fermées de diamètre 25 mm.

L'utilisation de ce dispositif de prélèvement est décrite dans les protocoles INRS MétroPol M-274, NIOSH 0500, IRSST 48-1, et la norme NF X 43-257.

Le protocole M-274 concerne les aérosols en fraction inhalable et ne comprend pas de données de validation. Le prélèvement est effectué à 2 L.min⁻¹, pendant 8 heures, avec une CFC 37 mm équipée d'une membrane PVC 5 µm et d'un tampon de cellulose. L'utilisation de la membrane PVC nécessite de procéder à une neutralisation des charges électrostatiques. Le protocole M-274 indique qu'il est également possible d'utiliser une CFC de diamètre 25 mm ou une CFC 37 mm équipée d'une capsule interne (Accu-Cap®) permettant de prendre en compte les dépôts sur les parois. Ce dernier dispositif (CFC+Accu-Cap®) est spécifiquement décrit § 4.4.1.5. Des indications de mise en œuvre complémentaires sont disponibles dans la fiche MétroPol cassette.

Les autres protocoles recensés mettant en œuvre la CFC rapportent que ce dispositif permet de prélever la fraction totale de l'aérosol et ne mentionnent pas la fraction inhalable :

- le protocole NIOSH 0500 concerne la fraction totale collectée pour des « particules non-réglémentées par ailleurs ». Le prélèvement met en œuvre une CFC équipée d'une membrane PVC 5 μm et un tampon (matière non précisée) à un débit de 1-2 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. Le protocole recommande de ne pas dépasser un volume prélevé de 133 L pour une concentration de 15 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- le protocole IRSST 48-1 décrit le prélèvement des poussières totales en cassette de 37 mm ou 25 mm, équipées d'un filtre PVC à un débit de 1,5 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ pendant 2 heures ;
- la norme NF X43-257 spécifie dans son domaine d'application, que la CFC présente un accord global avec la courbe conventionnelle relative à la fraction inhalable en terme d'efficacité de captage jusqu'à un diamètre aérodynamique d'environ 20 μm , pour des vitesses d'air inférieures ou égales à 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Elle précise que la cassette, à condition d'analyser l'ensemble des particules captées (ayant pénétrées dans la cassette, c'est-à-dire prenant en compte le dépôt sur les parois), est utilisée pour la surveillance des niveaux d'exposition individuelle de certains polluants particuliers dont le spectre granulométrique est supposé correspondre à ces caractéristiques (métaux, métalloïdes, acides, bases, HAP, etc...). La norme alerte également sur la problématique de l'étanchéité entre les différentes pièces de la cassette qui peut ne pas être parfaite et spécifie explicitement que la cassette doit-être positionnée de telle façon que l'axe d'aspiration soit horizontal ;
- le guide INHST CR-03/2006 indique que « *La cassette fermée en polystyrène de 37 mm ne peut pas être utilisée pour l'échantillonnage de la fraction inhalable car elle ne répond pas aux exigences des normes susmentionnées*¹⁶. ». La CFC n'est pas mentionnée parmi les dispositifs recommandés par la norme FD CEN/TR 15230 pour prélever la fraction inhalable.

Plusieurs études de laboratoire ont évalué l'efficacité de collecte de la CFC par rapport à la fraction conventionnelle inhalable tant en granulométrie qu'en masse prélevée (Kenny, Aitken, *et al.*, 1997;Woehkenberg *et al.*, 1998, Kenny *et al.*, 1999, Li *et al.*, 2000, Aizenberg, England, *et al.*, 2000 ; Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b, Witschger *et al.* 2004, Görner *et al.*, 2010, Sleeth *et al.*, 2012). L'objectif de ces études était par ailleurs de comparer l'efficacité de la CFC par rapport à d'autres dispositifs tels que l'IOM, le GSP-3.5, le CIP 10 et le Button.

Toutes ces études de laboratoire convergent vers des conclusions similaires :

- une sous-estimation de la fraction conventionnelle à partir d'une taille de particule se situant entre 20 et 40 μm (biais négatif > 30%, Cf. Annexe 2.3). Ce sous-échantillonnage est plus important aux vitesses d'air élevées ($\sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Kenny et Gussman, 1997) et très faibles ($< 0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Kenny *et al.*, 1999, Witschger *et al.*, 2004, Sleeth *et al.*, 2012). Le sous-échantillonnage important observé par Sleeth *et al.*, 2012 pour l'ensemble des tailles de particules testées (9,5 à 62 μm) à des faibles vitesses d'air (0,1 à 0,4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) ou par Kenny *et al.* en 1999 pourrait s'expliquer par l'orientation à 45° de la cassette ;
- un dépôt de particules sur les parois, non pris en compte dans l'analyse gravimétrique (effet moins gênant lorsque la quantification est réalisée par analyse chimique permettant une percolation de la CFC avec une solution appropriée). Li *et al.*, 2000 montrent notamment que lorsque la CFC est positionnée face au flux d'air, les pertes sur les parois sont importantes à partir d'une taille de particules d'environ 40 μm correspondant au phénomène de sous-échantillonnage observé ;
- une efficacité dépendante de l'orientation de la cassette, notamment une inclinaison vers le bas de la cassette réduit de manière notable la quantité de particules prélevées par rapport à une orientation horizontale de la CFC et augmente le biais négatif par rapport à la fraction conventionnelle inhalable (Görner *et al.*, 2010).

¹⁶EN 481 notamment pour la définition de la fraction inhalable

De nombreuses autres études de terrain mettant en œuvre la CFC ont également été réalisées. Ces études ne permettent pas d'apprécier le biais de ce dispositif vis-à-vis de la convention inhalable mais de comparer les résultats de la CFC avec ceux des autres dispositifs (Cf. § 4.4.1.12).

La CFC présente un biais négatif par rapport à la convention inhalable à partir d'une taille de particules comprise entre 20 et 40 μm . Ce biais négatif est important ($> 30\%$) et augmente aux vitesses d'air très faibles ($< 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ainsi qu'aux vitesses d'air $\geq 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

4.4.1.5 Description et performance du dispositif CFC 37mm et capsule interne vis-à-vis de la convention inhalable

Seul le protocole NIOSH 0501 décrit l'utilisation de ce système de prélèvement composé d'une CFC 2 pièces, d'une membrane PVC 37 mm 2 à 5 μm soudé à une capsule conique en PVC (connue également sous le nom d'Accu-Cap®). Ce dispositif permet de prendre en compte, lors de la pesée, les poussières qui se seraient déposées sur les parois de la CFC. Le débit recommandé varie de 1 à 2 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ pour un volume maximal de 333 L alors que le domaine d'application varie de 0,25 à 5 mg/capsule.

Görner *et al.*, 2010, dans une étude en tunnel aérodynamique avec un aérosol de micro-billes de verre (MMAD de 24 μm , GSD de 1,4) montrent que la prise en compte du dépôt sur les parois permet de réduire le biais négatif de la CFC seule par rapport à la fraction conventionnelle inhalable : biais de -15% contre environ -30% (estimation à partir d'une lecture graphique), et ce d'autant plus en air calme : biais de -1,6 à +5,7% contre environ -32% (estimation à partir d'une lecture graphique).

Sur la base de l'étude de Görner *et al.*, 2010, le dispositif CFC+ capsule interne permettant de prendre en compte le dépôt sur les parois présente un biais faible par rapport à la convention inhalable, notamment en air calme.

4.4.1.6 Description et performance du dispositif Flying Saucer 37 mm vis-à-vis de la convention inhalable

Seul le protocole OSHA PV 2121 utilise ce dispositif qui lui est spécifique et s'intègre dans une chaîne de pesée automatisée. Ce dispositif est dédié à la mesure de l'exposition aux poussières alvéolaires et non alvéolaires. Le dispositif comprend un filtre de 37 mm en PVC placé à l'intérieur d'une cassette similaire à la CFC mais moins haute et qui semble contenir un cône en aluminium, similaire à l'Accu-Cap pour éviter les dépôts sur les tranches de la cassette.

Ce dispositif n'a fait l'objet d'aucune validation par l'OSHA ou lors d'études expérimentales. Seul le protocole NIOSH 0501 indique qu'il est similaire au dispositif avec capsule interne.

4.4.1.7 Description et performance du dispositif Button vis-à-vis de la convention inhalable

Le « *Button Aerosol Sampler* » est un échantillonneur comprenant un filtre de diamètre 25 mm avec une entrée poreuse à surface courbe conçue pour améliorer les caractéristiques de collecte des poussières inhalables (diamètre aérodynamique $< 100 \mu\text{m}$). Selon le fabricant SKC, l'entrée incurvée, à orifices multiples, en acier inoxydable conducteur réduit les effets électrostatiques et réduit la sensibilité à la direction et à la vitesse d'air. La proximité du filtre par rapport à l'entrée minimise les pertes, assure une répartition égale de la charge de particules sur le filtre et une faible variation de l'échantillonnage. Un adaptateur d'étalonnage du débit de prélèvement facile à utiliser

est disponible pour l'échantillonneur Button. Un étui de transport en plastique conducteur est disponible pour l'expédition des filtres à un laboratoire pour analyse.

Ce dispositif de prélèvement est mentionné comme étant un échantillonneur de la fraction inhalable par la norme FD CEN/TR 15230, les guides HSE MDHS 14-4, INHST CR-03/2006 et le protocole INSHT MTA/MA-014/A11. Toutefois il n'a été recensé aucun protocole décrivant sa mise en œuvre.

De nombreuses études en laboratoire ont été réalisées pour vérifier l'efficacité de prélèvement en comparaison à la fraction conventionnelle et à d'autres dispositifs, avec un débit de prélèvement de $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (Li *et al.*, 2000, Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b, Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b, Aizenberg *et al.*, 2001, Witschger *et al.*, 2004, Görner *et al.*, 2010, Sleeth *et al.*, 2012). Ces études ont été réalisées en tunnel aérodynamique, à différentes vitesses d'air ($<0,1$ à $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), pour différentes orientations (0 , 90 et 180°) ou bien avec un mannequin en rotation.

Elles montrent que le Button a tendance à surestimer la fraction conventionnelle lorsqu'il est orienté face au flux d'air quelle que soit la vitesse d'air (Li *et al.*, 2000, Witschger *et al.*, 2004). Cette surestimation est plus importante pour les particules de grande taille. Lorsque le Button est orienté perpendiculairement ou dos au flux d'air, un biais négatif vis-à-vis de la convention inhalable est observé, ce biais étant du même ordre de grandeur à $0,5$ et $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Li *et al.*, 2000).

Pour des vitesses d'air $\geq 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, lorsque l'efficacité de prélèvement est moyennée selon les orientations ou bien lorsque les études ont été réalisées sur mannequin en rotation, le Button sous-échantillonne la fraction conventionnelle (Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000a, Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b, Aizenberg *et al.*, 2001, Görner *et al.*, 2010). Le biais négatif observé est peu important (variant d'environ 0 à -40% selon les études pour des tailles de particules inférieures à $70\mu\text{m}$) et augmente pour les particules de plus grosses tailles (Cf. Annexe 2.7). Pour des vitesses d'air $< 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, et des orientations moyennées, le Button surestime la fraction conventionnelle (Sleeth *et al.*, 2012 ; Görner *et al.*, 2010). Sleeth *et al.*, 2012, dans un tunnel aérodynamique à faibles vitesses d'air ($0,1$ à $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) observent une surestimation d'autant plus importante que la vitesse d'air est plus faible (étude sur mannequin en rotation).

La conception de l'entrée réduit le sur-échantillonnage des très grosses particules (Aizenberg *et al.*, 2001).

Dans l'étude de Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b, le Button sous-estime la fraction conventionnelle lorsque l'orientation est moyennée à $0,5$ et $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, le biais par rapport à la convention inhalable variant peu avec la vitesse d'air (Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b). Dans cette même étude, ils montrent que l'effet de l'orientation (0° , 90° ou 180°) n'est pas statistiquement significatif pour une vitesse d'air de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dans cette étude, les différences d'efficacité de prélèvement selon les différentes orientations sont moindres que celles observées dans l'étude de Li *et al.*, 2000 (Cf. Annexe 2).

L'échantillonneur Button a tendance à surestimer la fraction conventionnelle pour des vitesses d'air faibles et à présenter un biais négatif peu important vis-à-vis de la convention inhalable pour des vitesses d'air $\geq 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Il n'est pas possible de conclure sur un éventuel effet de l'orientation sur l'efficacité de prélèvement et sur le biais vis-à-vis de la convention inhalable en raison de résultats divergents entre les études recensées.

4.4.1.8 Description et performance du dispositif Seven-Hole (7-Hole) vis-à-vis de la convention inhalable

Le 7-hole est constitué d'un corps en plastique (des versions anciennes étaient constituées d'aluminium), à sept orifices d'entrée de 4 mm de diamètre. Les particules prélevées sont collectées sur un filtre de diamètre 25 mm à un débit de $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Les particules qui se déposent sur les surfaces internes sont considérées comme des pertes internes. Ce dispositif de prélèvement est

mentionné comme étant un échantillonneur de la fraction inhalable par les guides HSE MDHS 14-4 et INHST CR-03/2006. Toutefois il n'a été recensé aucun protocole décrivant sa mise en œuvre.

{Kenny, 1997 #223}, Kenny *et al.*, 1999 et Li *et al.*, 2000 ont étudié l'efficacité de ce dispositif vis-à-vis de la convention inhalable en réalisant des essais en tunnel aéraulique.

{Kenny, 1997 #223} (étude en tunnel aéraulique sur mannequin en rotation) montrent que le 7-hole est proche de la convention inhalable lorsque la vitesse d'air est de 0,5 m.s⁻¹ jusqu'à environ 30 µm (biais variable de -13 à +26%), puis il sous-échantillonne cette fraction (biais maximal de -35%). Il sous-échantillonne également la fraction inhalable lorsque la vitesse d'air est plus élevée (biais pouvant aller jusqu'à -100% selon les tailles de particules). L'étude de Li *et al.*, 2000, également réalisée en tunnel aéraulique mais sur mannequin fixe selon différentes orientations, montre que le 7-hole a tendance à sur-échantillonner lorsqu'il est orienté face au flux d'air par rapport aux autres orientations testées (90 et 180°), cette surestimation étant plus importante à 1 m.s⁻¹ qu'à 0,55 m.s⁻¹ (biais par rapport à la convention de +6 à +390% selon les tailles de particules, contre +6 à +100%).

Kenny *et al.*, 1999 ont étudié le comportement du 7-hole en l'absence de vitesse d'air mesurable. L'étude a été réalisée en chambre sur mannequin en rotation, avec un aérosol d'oxyde aluminium monodispersé (Dae = 6 à 90 µm, GSD = 1,2 – 1,4). Dans ces conditions, le 7-hole a tendance à sur-échantillonner la fraction inhalable pour des particules de tailles inférieures à environ 65 µm (biais de +11 à +62%), puis un biais négatif d'environ -25% est observé pour des tailles de particules de 74 et 90 µm.

A vitesse d'air faible, le 7-hole a tendance à sous-échantillonner les particules de taille supérieure à environ 30 µm par rapport à la convention inhalable. A vitesse d'air quasiment nulle, il surestime la fraction conventionnelle inhalable pour des particules de taille inférieure à environ 65 µm, puis sous-estime cette fraction pour des tailles supérieures. A vitesse d'air plus élevée, les biais observés sont plus importants et le 7-hole sous-estime la fraction conventionnelle inhalable. Le 7-hole est très sensible à l'orientation : face au flux d'air le sur-échantillonnage peut être extrêmement important pour les tailles de particules les plus grosses dans des conditions de vitesse d'air de 1 m.s⁻¹.

4.4.1.9 Description et performance du dispositif PAS-6

Le PAS-6 est mentionné comme étant un échantillonneur de la fraction inhalable par la norme FD CEN/TR 15230 et les guides HSE MDHS 14-4 et INHST CR-03/2006. Toutefois aucun des protocoles recensés ne décrit sa mise en œuvre.

Cet échantillonneur est en métal et les particules sont collectées sur un filtre de 25 mm. L'aérosol est aspiré à un débit de 2 L.min⁻¹ à travers un orifice conique de 6 mm qui est orienté vers le bas selon un angle d'environ 45° par rapport à l'horizontale. Seul le filtre est pesé (INHST CR-03/2006).

Seuls Kenny et Gussman, 1997 ont étudié l'efficacité de ce dispositif vis-à-vis de la convention inhalable en réalisant des essais en tunnel aéraulique, l'échantillonneur étant placé sur un mannequin en rotation. A une vitesse d'air de 0,5 m.s⁻¹, il est noté une légère surestimation de la fraction conventionnelle jusqu'à environ 40 µm, puis ensuite un sous-échantillonnage important des particules de 55 à 100 µm (biais de -58 à -70%, détermination graphique, Cf. Annexe 2.9). A 1 m.s⁻¹, il est noté une sous-estimation de la fraction conventionnelle pour toutes les tailles de particules testées (7 à 100 µm), le biais allant de -25 à -80% (détermination graphique). A des vitesses d'air élevées (4 m.s⁻¹), il est toujours noté un sous-échantillonnage pour toutes les tailles de particules (biais de -10 à -61%), hormis à 85 µm où une surestimation de +27% est observée.

Parmi les études recensées, seule une étude s'est intéressée aux performances du PAS-6. Son comportement vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable à des vitesses d'air

inférieures à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ n'a pas été étudié, ni l'influence de l'orientation de ce dispositif vis-à-vis du flux d'air sur l'efficacité de prélèvement. A $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, il surestime légèrement la fraction conventionnelle jusqu'à environ $40 \mu\text{m}$, puis un biais négatif important vis-à-vis de la convention inhalable est observé pour des particules de 55 à $100 \mu\text{m}$. Ce biais négatif augmente pour des vitesses d'air plus élevées et concerne toutes les tailles de particules testées (7 à $100 \mu\text{m}$).

4.4.1.10 Synthèse des performances des dispositifs vis-à-vis de la convention inhalable

A des vitesses d'air de l'ordre de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ voire inférieures, cas le plus courant dans les atmosphères de travail :

- ***l'IOM, le Button et le 7-hole surestiment la fraction conventionnelle ;***
- ***la CFC seule sous-estime la fraction conventionnelle à partir de 20 à $30 \mu\text{m}$;***
- ***la CFC + capsule interne, le GSP/CIS, le CIP10-I V2 et le PAS-6 sous-estiment la fraction conventionnelle à partir d'environ 40 - $50 \mu\text{m}$;***
- ***la sensibilité de l'IOM, du Button, de la CFC, du 7-hole et du GSP à l'orientation par rapport au flux d'air (face, perpendiculaire ou opposé) a été étudiée et quel que soit le dispositif, une orientation à 90° ou 180° diminue l'efficacité de captage et conduit à un sous-échantillonnage vis-à-vis de la fraction conventionnelle. La CFC est également très sensible à l'inclinaison de l'entrée du dispositif : une inclinaison vers le bas d'un angle de 45 à 90° , même si la CFC est orientée face au flux d'air, conduit à une efficacité de captage plus faible que lorsque que l'entrée est orientée horizontalement ;***
- ***plus la vitesse d'air est faible et plus :***
 - ***l'efficacité de prélèvement augmente pour l'IOM, le Button et le GSP avec pour conséquence un sur-échantillonnage plus important, ainsi que pour la CFC + capsule interne avec pour conséquence un biais moins important avec la courbe conventionnelle,***
 - ***l'efficacité de prélèvement diminue pour le CIP10-I-V2 et la CFC seule, avec pour conséquence un biais négatif plus important par rapport à la courbe conventionnelle,***
 - ***l'efficacité de prélèvement du PAS-6 n'a pas été étudiée pour des vitesses d'air inférieures à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, ni l'effet de l'orientation quelle que soit la vitesse d'air.***

A des vitesses d'air plus élevées (1 à 4 m.s^{-1}) :

- ***dans les études sur mannequin tournant ou moyennant les résultats selon les différentes orientations, une diminution de l'efficacité de prélèvement est observée pour l'IOM, le 7-hole, le GSP, la CFC seule. Par contre, lorsque ces dispositifs sont orientés face au flux d'air, ces dispositifs montrent une augmentation de l'efficacité de prélèvement, hormis pour la CFC seule. L'efficacité de prélèvement de la CFC + capsule interne n'a pas été étudiée pour des vitesses d'air supérieures à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Concernant le CIP10-I-V2, son efficacité de prélèvement est meilleure à une vitesse de 1 m.s^{-1} qu'en air calme (le biais vis-à-vis de la convention diminue). Le Button sous-estime la fraction conventionnelle.***

Quelle que soit l'étude prise en compte, la CFC seule est l'échantillonneur qui présente des biais de sous-échantillonnage avec la convention inhalable les plus importants pour des particules de tailles supérieures à 20 - $30 \mu\text{m}$ avec un biais négatif inférieur à -25% .

L'efficacité d'échantillonnage du Button est moins dépendante de la vitesse de l'air que pour l'IOM, la CFC seule et le GSP. Cette efficacité est relativement similaire à celle de l'IOM.

Le dispositif « Flying saucer » en l'absence de données de validation n'a pas été évalué pour le prélèvement de la fraction inhalable.

Les figures suivantes illustrent les efficacités d'échantillonnage de différents dispositifs à 0,5 m.s⁻¹.

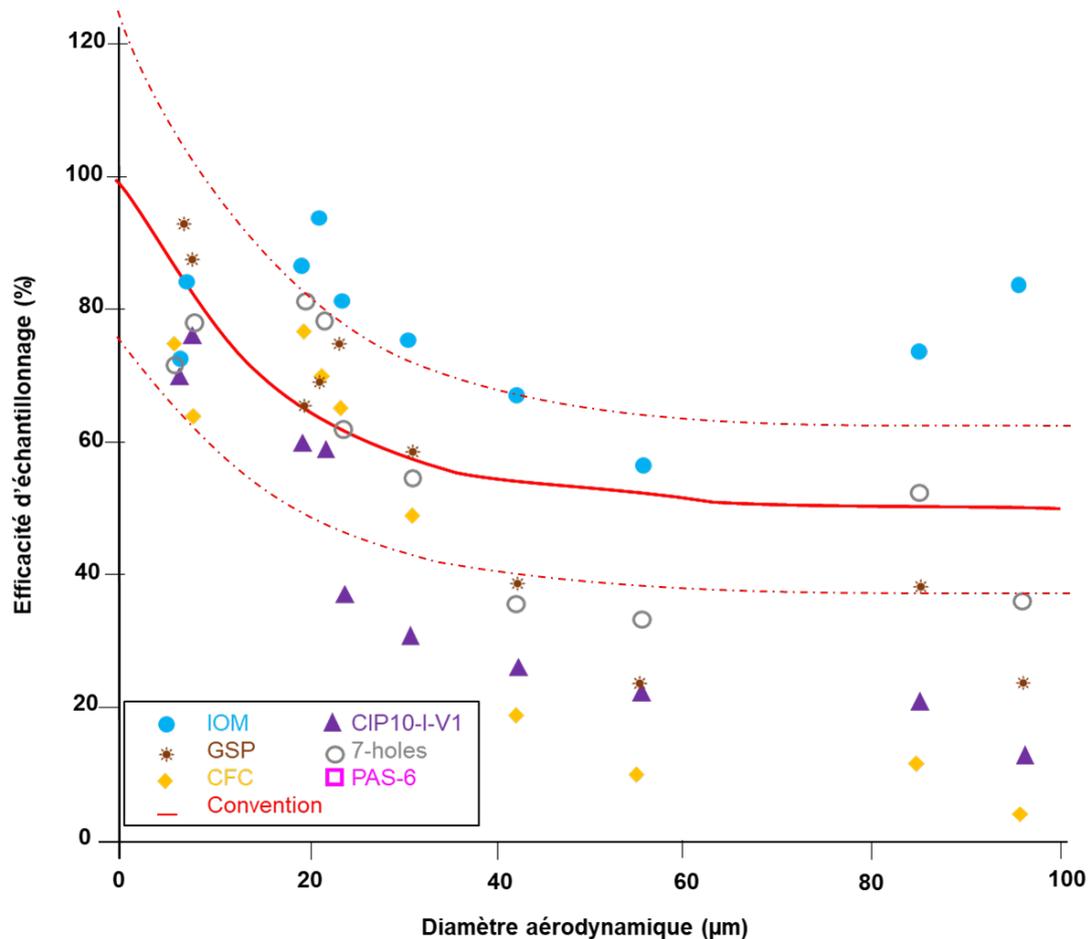


Figure 4 : Comparaison de l'efficacité de différents préleveurs, mannequin en rotation, vitesse d'air = 0,5 m.s⁻¹ (d'après Kenny et al. 1997)

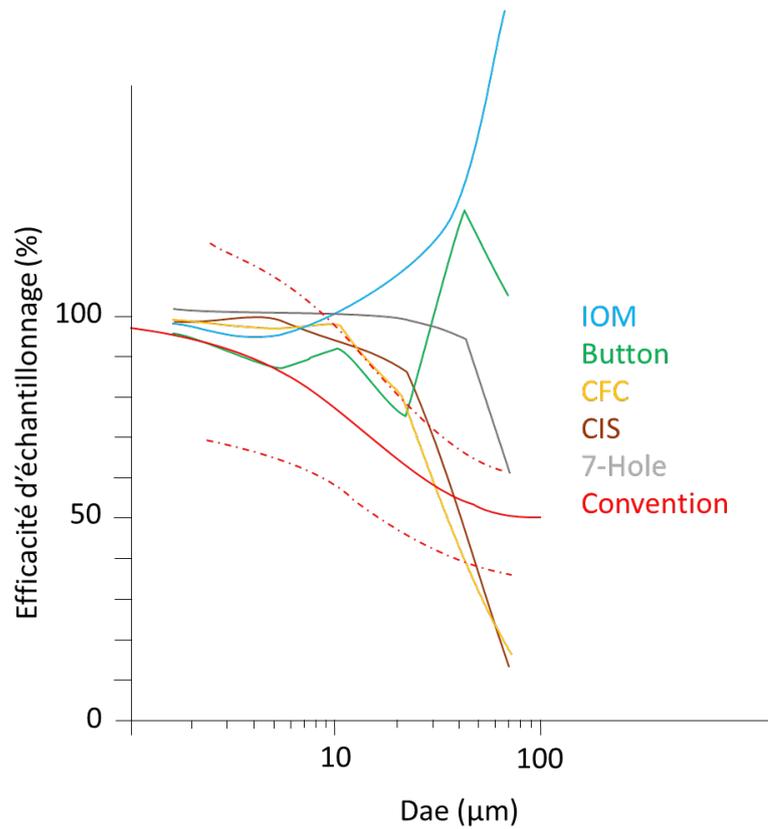


Figure 5 : Comparaison de l'efficacité de différents préleveurs, orientation 0° (face au flux d'air), vitesse d'air=0,55 m.s⁻¹ (d'après Li et al., 2000)

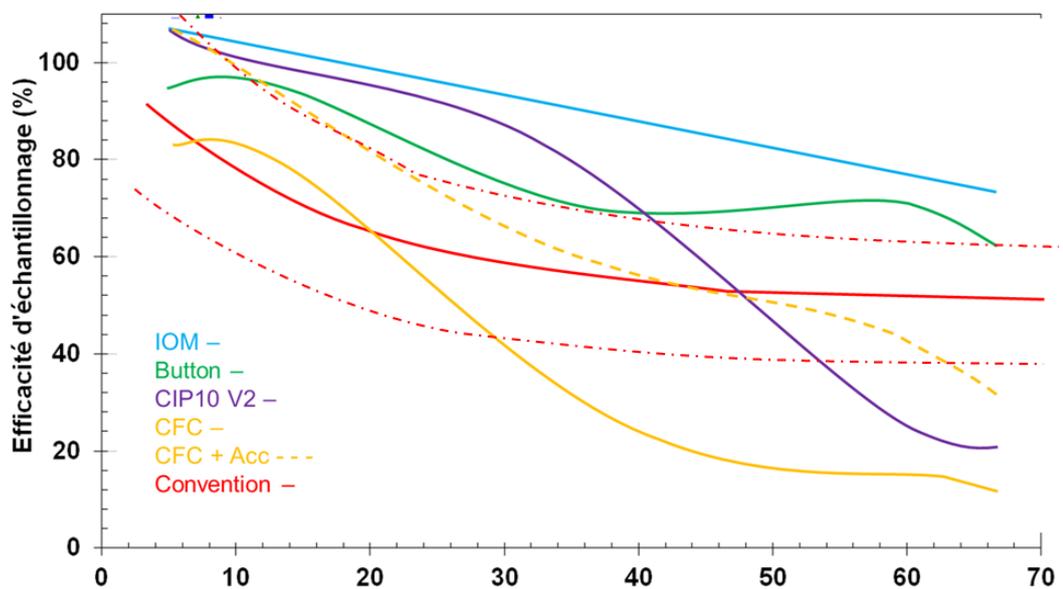


Figure 6 : Comparaison de l'efficacité de différents préleveurs, mannequin en rotation, air calme (vitesse d'air << 0,5 m.s⁻¹) (d'après Görner et al., 2010)

4.4.1.11 Précision/répétabilité des dispositifs :

Certaines des études recensées visant à évaluer les performances de différents échantillonneurs au regard de la fraction conventionnelle inhalable se sont également intéressées à la précision de ces échantillonneurs.

Au cours de leur étude en 1997, Kenny *et al.* ont déterminé la précision de chaque dispositif en considérant la variance résiduelle pour les 3 vitesses d'air testées (4, 1 et 0,5 m.s⁻¹). A 0,5 et 1 m.s⁻¹, le GSP-3.5 est l'échantillonneur le plus fidèle, suivi du PAS-6. Dans ces conditions, l'IOM et la CFC seule sont les moins bons dispositifs. A 4 m.s⁻¹, le Perspec est le plus fidèle suivi du GSP et de la CFC. Kenny *et al.* n'ont pas étudié le dispositif Button.

Aizenberg, Grinshpun, *et al.*, 2000b et Görner *et al.*, 2010 ont évalué la répétabilité de différents préleveurs à l'aide du coefficient de variation de l'efficacité d'échantillonnage (études en tunnel aérodynamique, pour différentes orientations ou sur mannequin tournant). A 0,5 m.s⁻¹, les deux études mettent en évidence que le dispositif le plus précis est le Button avec un coefficient de variation moyen < 8%. Les coefficients de variation de la CFC + capsule interne, le CIP10-I-V2 et l'IOM sont inférieurs à 10%. La CFC seule est le dispositif le moins performant avec un coefficient de variation supérieur à 15% (Cf. Tableau 9).

Les trois études n'ayant pas évalué les mêmes dispositifs, ni évalué la précision selon la même méthodologie, il est difficile de conclure. Toutefois, le dispositif apparaissant le plus précis est le Button. La CFC + capsule, le CIP10-I-V2 et l'IOM présentent une précision comparable.

Tableau 9 : Classement des échantillonneurs par ordre de précision et répétabilité décroissante

| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000b | Görner <i>et al.</i> , 2010 |
|--------------------------|---|-------------------------------|
| CIP10-I-v1 | Button (7,28%) | Button (6,71%) |
| PAS 6 | IOM (10,92%) | CIP10-I-V2 (7,69%) |
| GSP | GSP (11,18%) | IOM (7,76 %) |
| CFC seule | CFC seule (21,2%) | CFC + capsule interne (8,02%) |
| IOM | - | CIP10-I-v1 (10,3%) |
| 7-hole | - | CFC seule (15,69%) |

Données entre parenthèses = coefficients de variation de l'efficacité d'échantillonnage

4.4.1.12 Etudes de comparaison des dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable sur le terrain

De nombreuses études de terrain dans différents secteurs d'activité ont été réalisées en mettant en œuvre de manière simultanée plusieurs dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable.

Il n'a pas été réalisé de recherche bibliographique exhaustive de ce type d'études, celles-ci étant trop nombreuses et n'ont généralement pas pour but de comparer l'efficacité des échantillonneurs vis-à-vis de la convention, mais de comparer leur efficacité entre eux. Toutefois, parmi les études identifiées lors de la requête bibliographique visant à documenter l'efficacité de prélèvement vis-à-vis de la fraction inhalable (Cf. 4.4.1), certaines études ont été retenues car apportant un éclairage sur le comportement de ces échantillonneurs sur le terrain (Tsai *et al.*, 1995, Werner *et al.*, 1996, Harper *et al.*, 2002, Harper, Muller, *et al.*, 2002, Kerr *et al.*, 2002, Calzavara *et al.*, 2003; Tatum *et al.*, 2001 ; Teikari *et al.*, 2003 ; de Vocht *et al.*, 2006 ; Deygout *et al.*, 2010, Kauffer *et al.*, 2010, Skaugset *et al.*, 2013).

De manière générale, l'IOM était pris comme référence pour effectuer ces comparaisons et la plupart des études visent à évaluer l'efficacité de la CFC seule par rapport à l'IOM. Les concentrations mesurées à l'aide de l'IOM sont supérieures aux concentrations mesurées avec d'autres

échantillonneurs quel que soit le secteur d'activité (Tsai *et al.*, 1995 ; Werner *et al.*, 1996, Harper et Muller, 2002, Harper, Muller, *et al.*, 2002, Kerr *et al.*, 2002, Calzavara *et al.*, 2003; Tatum *et al.*, 2001 ; Teikari *et al.*, 2003 ; de Vocht *et al.*, 2006 ; Deygout *et al.*, 2010, Kauffer *et al.*, 2010, Skaugset *et al.*, 2013).

Demange *et al.*, 2002 trouvent, à condition de prendre en compte les particules déposées sur les parois de la CFC, une efficacité similaire à l'IOM lors de mesures statiques (pas d'effet orientation) réalisées dans trois fonderies, en présence d'aérosols métalliques d'une granulométrie médiane de 7 µm (maximum de 50 µm). D'autres études confirment la capacité de la CFC seule à avoir une efficacité équivalente à celle des dispositifs de la fraction inhalable dès lors que l'on est en présence d'aérosols de faible granulométrie (Calzavara *et al.*, 2003; Deygout *et al.*, 2010). Cette situation est également décrite par Werner *et al.*, 1996 qui indiquent, après avoir analysé plusieurs centaines de mesures appariées, que le ratio de l'efficacité de captage de l'IOM sur l'efficacité de captage de la CFC seule décroît avec la granulométrie de l'aérosol (de 3,2 pour des aérosols grossiers à 1,2 pour des aérosols fins). Le protocole INSHT CR-03/2006 sur la base de mesures appariées en entreprises indique un ratio IOM/CFC variant de 1,8 à 5 en fonction de différents procédés.

Lorsque les dépôts sur les parois sont pris en compte (notamment dans le cas d'une analyse chimique (Calzavara *et al.*, 2003, Deygout *et al.*, 2010) ou de l'utilisation d'une capsule interne (Kauffer *et al.*, 2010), ce ratio diminue et est proche de 1.

Dans l'industrie du bois, Tatum *et al.* montrent en 2001 que la CFC seule est le dispositif le plus fidèle, suivi du CIS, du 7-hole et de l'IOM. Les variabilités les plus importantes sont observées lorsqu'il y a des émissions de particules plus larges. L'hypothèse avancée est la large ouverture de l'IOM et du CIS qui impliquerait une pénétration de particules de plus grande taille et ainsi une plus grande variabilité des concentrations mesurées. Cette hypothèse est vérifiée par Harper, Muller, *et al.*, 2002 et Harper et Muller, 2002 qui ont retrouvé des particules supérieures à 100 µm sur les filtres d'une CFC et un IOM, mais pas sur le Button et qui observent que les différences les plus importantes sont observées au cours des tâches produisant de larges particules couvrant les opérateurs. Les ratios de concentrations entre échantillonneurs les plus élevés sont observés pour les concentrations les plus élevées. Les différences entre les concentrations mesurées par l'IOM et celles mesurées par la CFC seule, ainsi que les concentrations mesurées par l'IOM et celles mesurées par le Button sont statistiquement significatives, au contraire des différences de concentrations mesurées par la CFC seule et le Button (Harper et Muller, 2002).

Les différences observées entre les concentrations mesurées par différents échantillonneurs de la fraction inhalable dans les études réalisées sur le terrain sont moindres que celles observées dans les études en laboratoires. Les ratios dépendent des caractéristiques des particules collectées et notamment de la distribution granulométrique. Certains dispositifs comme l'IOM sont notamment susceptibles de prélever des particules de grande taille (supérieur à 100 µm). Les études de terrain confirment que la CFC avec prise en compte des dépôts sur les parois et la CFC+ capsule interne conduisent à des résultats comparables à l'IOM.

4.4.1.13 Conclusions sur l'efficacité des dispositifs d'échantillonnage de la fraction inhalable

En conclusion, sur la base des normes et protocoles existants, ainsi que des études expérimentales, en laboratoire et de terrain, les différents dispositifs décrits ci-dessus présentent des efficacités d'échantillonnage variables, dépendantes de la granulométrie de l'aérosol et des conditions environnementales notamment la vitesse d'air et de l'orientation. Aucun dispositif ne répond parfaitement aux exigences en terme d'efficacité

d'échantillonnage au regard de la fraction conventionnelle inhalable dans toutes les situations environnementales et sur l'ensemble de la plage granulométrique d'intérêt. La plupart des études expérimentales ont évalué ces dispositifs avec des aérosols de granulométrie allant jusqu'à environ 70 µm, et pour des vitesses d'air allant de 4 m.s⁻¹ à des vitesses inférieures à 0,1 m.s⁻¹.

Au regard de l'ensemble des données analysées, et des conditions généralement rencontrées sur les lieux de travail (vitesse d'air < 0,5 m.s⁻¹), la CFC seule et le PAS-6 sont classés en catégorie 3 pour le critère d'évaluation « conformité à la fraction conventionnelle » et ne sont donc pas recommandés pour la mesure de la fraction inhalable. En effet :

- la CFC seule, bien qu'elle soit la plus proche de la fraction conventionnelle pour des aérosols de granulométrie < à 20-30 µm, présente un sous-échantillonnage important à partir de 20-30 µm, quelle que soit la vitesse d'air. Ce sous-échantillonnage est le plus important de tous les dispositifs évalués. Il est noté une diminution de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air les plus faibles et ≥ 1 m.s⁻¹. Cet échantillonneur est également particulièrement sensible à l'orientation, tant dans un plan horizontal que vertical. L'efficacité de collecte de la CFC (seule) n'est donc pas satisfaisante ;
- le comportement du PAS-6 vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable à des vitesses d'air inférieures à 0,5 m.s⁻¹ n'a pas été étudié, ni l'influence de l'orientation de ce dispositif vis-à-vis du flux d'air sur l'efficacité de prélèvement ;
- Le CIP10-I-V1 : ce dispositif a fait l'objet de modifications dans sa conception afin d'améliorer ses performances. La version 2 présente une efficacité d'échantillonnage supérieure et un biais vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable moins important.

Les autres dispositifs - Button, CFC + capsule interne, CIP10-I-v2, GSP-3.5, IOM et 7-Hole - sont classés en catégorie 2 pour le critère d'évaluation « conformité à la fraction conventionnelle » au regard de la convention inhalable. En effet :

- les biais observés dans les conditions proches de l'air des lieux de travail (vitesse d'air $\leq 0,5$ m.s⁻¹) vis-à-vis de la convention sont moindres que ceux observés avec la CFC seule ;
- la sous-estimation de la fraction conventionnelle débute pour des particules de tailles plus grandes (environ 40 à 50 µm pour le GSP-3,5 et la CFC + capsule interne contre 20-30 µm la CFC seule) ;
- le Button semble être plus précis et moins sensible à la vitesse d'air que les autres dispositifs ;
- le Button et l'IOM ont tendance à surestimer la fraction conventionnelle. Le 7-Hole surestime dans des conditions d'orientation face au flux d'air et à des vitesses d'air faibles.

Le Tableau 10 présente une synthèse du classement des dispositifs de prélèvement au regard de leur efficacité de prélèvement vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable.

Tableau 10 : Synthèse du classement des dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable au regard de l'efficacité de prélèvement

| Dispositif de prélèvement | Protocoles | Caractéristiques vis-à-vis de la fraction | Classement | Limites |
|---------------------------|--|--|------------|---|
| Button | FD CEN/TR 15230 décrit dans la littérature | Surestimation de la fraction conventionnelle inhalable | 2 | Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles Légère augmentation de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$ |
| CFC | INRS MétroPol M-274 NIOSH 0500 IRSST 48-1 NF X43-257 INHST CR_003_A06 INRS MétroPol cassette | Sous-estimation importante de la fraction conventionnelle inhalable au-dessus de 20 à 30 μm | 3 | Grande sensibilité à l'inclinaison, et à l'orientation. Diminution de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air faibles, et vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$ (sous-estimation plus importante) |
| CFC + capsule interne | Görner <i>et al.</i> , 2010 | Sous-estimation importante de la conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 μm | 2 | Effet de l'inclinaison non étudié. Biais moins important avec la courbe conventionnelle inhalable aux vitesses d'air faibles. L'efficacité de prélèvement n'a pas été étudiée pour des vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$. |
| CIP-10 I V1 | MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 IRSST MA-373 | Sous-estimation de la conventionnelle inhalable pour toutes les tailles de particule et importante pour les tailles supérieures à 30 μm | 3 | A vitesses d'air $\leq 1 \text{ m.s}^{-1}$ sous-échantillonnage important. A vitesses d'air plus élevées, sur-échantillonnage important à partir de 30 μm . |
| CIP-10 I V2 | INHST MTA/MA_014_A11 | Sous-estimation importante de la conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 μm | 2 | Diminution de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air faibles (sous-estimation plus importante) Augmentation de l'efficacité de prélèvement à 1 m.s^{-1} (diminution du biais vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable) |
| GSP / CIS | BIA 7284 DFG MAK sampling and determining aerosols FD CEN/TR 15230 MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 INSHT MTA/MA_014_A11 | Sous-estimation importante de la conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 μm | 2 | Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles Aux vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$, augmentation ou diminution de l'efficacité de prélèvement selon l'orientation (face au flux d'air ou moyennée) Dépôt sur les parois pouvant être important pour les Dae les plus élevés. |
| IOM | MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 IRSST MA-373 INHST MTA/MA_014_A11 | Surestimation de la fraction conventionnelle inhalable | 2 | Possible captation de grosses particules émises dans certains procédés via l'ouverture du dispositif Sur-échantillonnage des particules de diamètre supérieur à 70 μm Cassette inox à privilégier Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles. Aux vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$, augmentation ou diminution de l'efficacité de prélèvement selon l'orientation (face au flux d'air ou moyennée) |

| Dispositif de prélèvement | Protocoles | Caractéristiques vis-à-vis de la fraction | Classement | Limites |
|---------------------------|-------------------------------|---|------------|---|
| 7-hole | MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 | Sous-estimation de la fraction conventionnelle aux tailles supérieures à 30 µm | 2 | Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air très faibles et face au flux d'air |
| PAS-6 | MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 | Sur estimation de la fraction conventionnelle pour des tailles inférieures à 40 µm puis biais négatifs importants pour des tailles de 55 à 100 µm | 3 | 1 seule étude à des vitesses d'air supérieures à 0,5 m.s ⁻¹ et sans étude de l'influence de l'orientation de ce dispositif vis-à-vis du flux d'air sur l'efficacité de prélèvement |

4.4.2 Évaluation des dispositifs au regard de la VLEP-8h inhalable établie par le CES : Évaluation de la gravimétrie

Limite basse de 0,1 X VLEP-8h :

Le tableau suivant synthétise les concentrations obtenues en fonction des LQ (en µg) basses et élevées retenues pour chaque support (Tableau 11).

La valeur minimale devant être atteinte est 0,1 VLEP-8h soit **0,4 mg.m⁻³** ; les concentrations en vert soulignent que le support est adapté à l'analyse gravimétrique au regard de la VLEP-8h proposée, et pour le débit associé. En effet, différents débits ont été représentés et sont fonction des échantillonneurs évalués au § 4.4.1.

Tableau 11 : Concentrations obtenues à partir des LQ des différents supports compatibles avec les dispositifs de prélèvements de la fraction inhalable

| Support | Caractéristique | LQ (en µg) | Débit (L.min ⁻¹) / vol (L) | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------|--|----------|-------------|-----------|------------|
| | | | 1 480 | 2 960 | 3,5 1680 | 4 1920 | 10 4800 |
| PVC | Ø25 | basse 83 | 0,17 | 0,09 | 0,05 | 0,04 | - |
| | | élevée 100 | 0,21 | 0,10 | 0,06 | 0,05 | - |
| | Ø37 | basse 17 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | - | - |
| | | élevée 333 | 0,69 | 0,35 | 0,20 | - | - |
| | capsule int. Ø37 | basse 150 | 0,31 | 0,16 | - | - | - |
| | | élevée 377 | 0,79 | 0,39 | - | - | - |
| cass IOM plastique Ø 25 | 333 | - | 0,35 | - | - | - | |
| EC | Ø37 | basse 500 | 1,04 | 0,52 | 0,30 | 0,26 | - |
| | | élevée 1000 | 2,08 | 1,04 | 0,60 | 0,52 | - |
| | capsule int. Ø37 | basse 150 | 0,31 | 0,16 | - | - | - |
| | | élevée 377 | 0,79 | 0,39 | - | - | - |
| Fibres de verre | Ø25 | basse 57 | 0,12 | 0,06 | 0,03 | 0,03 | - |
| | | élevée 400 | 0,83 | 0,42 | 0,24 | 0,21 | - |
| | Ø37 | basse 30 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | - | - |
| | | élevée 1000 | 2,08 | 1,04 | 0,60 | - | - |
| | cass IOM plastique Ø 25 | 92 | - | 0,10 | - | - | - |
| | cass IOM acier Ø 25 | 64 | - | 0,07 | - | - | - |
| Filtre quartz | Ø37 | basse 30 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | - | - |
| | | élevée 333 | 0,69 | 0,35 | 0,20 | - | - |
| Mousse PU | coupelle CIP 10 | basse 463 | - | - | - | - | 0,10 |
| | | élevée 3330 | - | - | - | - | 0,69 |

Les supports PVC sont appropriés et permettent d'atteindre quasiment systématiquement 0,1 fois la VLEP-8h pour l'ensemble de la gamme de valeurs de LQ retenues et ce quels que soient le diamètre des membranes et les débits d'utilisation. Cela nécessite une bonne gestion des supports au regard des charges électrostatiques (neutralisation avant pesée ou lavage triton des supports).

La seule exception correspond au cas de la LQ élevée obtenue en CFC + capsule interne de diamètre 37 mm pour un débit de 1 L.min⁻¹.

Concernant le CIP10, la valeur de LQ basse permet d'atteindre 0,1 fois la VLEP-8h, toutefois, la valeur de la LQ élevée est supérieure au dixième de la VLEP-8h.

Limite haute de 2 X VLEP-8h :

La valeur maximale devant être atteinte est de 2*VLEP-8h soit **8 mg.m⁻³**

Le tableau suivant représente les charges portées par le support dans le cas d'un prélèvement de 8 heures ou de deux prélèvements de 4 heures. En se référant aux valeurs du Tableau 12, les membranes PVC ou EC de diamètre 37 mm sont capables de prélever jusqu'à **8,7 mg maximum** (valeurs en vert). Dans ce cas, seuls les prélèvements à des débits de 1 et 2 L.min⁻¹ sur 8 heures sont possibles. Les prélèvements à 3,5 et 4 L.min⁻¹ sont envisageables uniquement à condition d'effectuer deux prélèvements de 4 heures.

Pour les membranes de diamètre 25 mm, la charge maximale est de **4 mg**. Seul le prélèvement à 1 L.min⁻¹ est possible pour réaliser un prélèvement de 8 heures. En considérant un prélèvement de 4 heures, tous les débits peuvent être utilisés. Pour le prélèvement à 10 L.min⁻¹ (CIP 10), la charge maximale (65 mg) n'est pas atteinte quelle que soit la durée du prélèvement.

Tableau 12 : Charge maximale du support PVC ou EC (en mg) à 2 VLEP-8h inhalable, en fonction du temps de prélèvement et du débit de prélèvement

| Débit | Volume (L) pour 8h | charge (en mg) si 1 prélèvement de 8 heures | charge (en mg) si 2 prélèvements de 4 heures |
|-------|--------------------|---|--|
| 1 | 480 | 3,8 | 1,9 |
| 2 | 960 | 7,7 | 3,8 |
| 3,5 | 1680 | 13,4 | 6,7 |
| 4 | 1920 | 15,4 | 7,7 |
| 10 | 4800 | 38,4 | 19,2 |

En se référant aux valeurs du Tableau 8, les filtres en fibres de quartz de diamètre 37 mm sont capables de prélever jusqu'à **26,1 mg**. Dans ce cas, pour 8 heures de prélèvement, seuls les débits à 1 et 2 L.min⁻¹ sont possibles. Des prélèvements de 4 heures peuvent être envisagés pour l'ensemble des débits. Pour un diamètre 25 mm, la charge maximale est de **11,9 mg**, ce qui impose pour effectuer un prélèvement de 8 heures d'utiliser des débits de 1 ou 2 L.min⁻¹. Des prélèvements à 3,5 et 4 L.min⁻¹ sont possibles uniquement à condition d'effectuer deux prélèvements de 4 heures. Néanmoins, ces supports étant relativement « sensibles » à la dégradation (pertes de fibres lors des manipulations), ces supports ne sont pas à privilégier pour une analyse gravimétrique.

Les membranes PVC et les filtres en fibres de quartz sont les supports de prélèvement les plus appropriés et permettent d'atteindre quasiment systématiquement 0,1 *VLEP-8h pour l'ensemble de la gamme de valeurs de LQ retenues et ce quels que soient le diamètre des membranes et les débits d'utilisation, quels que soient donc les dispositifs de prélèvement.

En raison du coefficient de rétention des membranes PVC et filtres en fibres de quartz, seuls les dispositifs mettant en œuvre un débit de prélèvement de 1 à 2 L.min⁻¹ peuvent être utilisés pour effectuer un prélèvement de 8 heures à 2*VLEP-8h, c'est-à-dire IOM, CFC et CFC+capsule interne. Pour les dispositifs mettant en œuvre un débit de 3,5 ou 4 L.min⁻¹ (GSP, CIS et Button), il sera nécessaire d'effectuer 2 prélèvements de 4 heures. Le CIP10 permet également d'effectuer des prélèvements de 8 heures à 10 L.min⁻¹.

Il est à noter que les membranes PVC sont électrostatiques dans certaines conditions. Il convient donc d'effectuer les corrections appropriées (pesées de blancs).

Les membres EC ne permettent généralement pas d'atteindre le domaine 0,1 à 2 fois la VLEP-8h hormis dans le cas d'une utilisation avec une CFC + capsule interne à 2 L.min⁻¹.

Les filtres en fibres de quartz et de verre ne sont pas à privilégier pour une analyse gravimétrique en raison de la « dégradation » (pertes de fibres lors des manipulations), hormis dans le cas d'une utilisation avec l'IOM et d'une pesée de l'ensemble « cassette IOM + filtre ».

4.5 Évaluation détaillée des méthodes de mesure de la fraction alvéolaire des PSES dans l'air des lieux de travail

L'évaluation des méthodes de mesure a été réalisée au regard de la VLEP établie par le CES.

Exigences : Compte tenu de la VLEP-8h proposée, les méthodes doivent être validées sur l'intervalle de concentrations suivant :

- 0,1 à 2 *VLEP-8h : 0,09 – 1,8 mg.m⁻³ pour le contrôle technique réglementaire de la VLEP-8h

4.5.1 Efficacité d'échantillonnage des échantillonneurs individuels de la fraction alvéolaire

Les dispositifs de prélèvement individuels disponibles de la fraction alvéolaire se classent en 2 catégories : (1) les cyclones; (2) la coupelle tournante (CIP10).

D'autres types de dispositifs sont également mentionnés pour la mesure de la fraction alvéolaire, correspondant à des dispositifs de mesure de plusieurs fractions simultanément et faisant l'objet d'un chapitre spécifique dans le rapport (§ 4.6) : IOM multi dust uniquement listé dans la norme FD CEN/TR 15230 et préconisé dans le protocole HSE MDHS 14-4 et les impacteurs dont l'impacteur PPI8 mentionné dans le protocole HSE MDHS 14-4.

Une liste d'échantillonneurs pour la fraction alvéolaire d'aérosols est recensée dans le guide FD CEN/TR 15230 de 2005 (voir tableau B.3 du guide). Seuls les modèles de cyclones et de CIP-10R décrits dans les protocoles, leurs caractéristiques et performances sont détaillées dans la suite du document.

Afin de compléter les informations relatives à l'efficacité des échantillonneurs vis-à-vis de la fraction alvéolaire, une recherche dans la littérature a été réalisée. La requête suivante a été formulée sur SCOPUS le 12 décembre 2017 :

- TITLE-ABS-KEY (aerosol AND sampler AND respirable AND occupational)

Un tri a été réalisé sur titre et résumé, puis une analyse critique à partir du texte intégral ce qui a permis d'**identifier des études complémentaires et de décrire les performances des échantillonneurs sur la base de 15 articles.**

4.5.1.1 Description et performances des dispositifs utilisant des cyclones

Le cyclone est le dispositif de prélèvement de la fraction alvéolaire le plus utilisé, il permet d'éliminer les poussières de grands diamètres (thoraciques et voies respiratoires hautes), pour ne collecter sur un support que celles satisfaisant à la convention alvéolaire (EN 481 et ISO 7708).

Le principe général de la méthode de prélèvement utilisant un cyclone consiste à prélever les particules dans l'air ambiant par aspiration au niveau d'un orifice de petite dimension dans un cyclone constituant le dispositif sélecteur. La plupart des cyclones utilisent une entrée d'air tangentielle. Le cyclone permet de retenir les particules de plus grosses tailles par forces d'inertie centrifuge. Les particules ayant une inertie suffisante sont guidées par la force centrifuge vers la périphérie du cyclone où elles sédimentent par effet de gravité. Les particules les plus fines, de plus faible inertie, s'éloignent moins de l'axe du cyclone et sont entraînées par le vortex intérieur ascendant vers la sortie axiale située à l'extrémité supérieure du cyclone et sont alors collectées sur un filtre monté dans un support porte-filtre placé entre le corps du cyclone et la pompe. Le matériau standard du cyclone est le nylon, cependant, pour éviter des artefacts dus aux charges électrostatiques, il est préférable d'utiliser des matériaux conducteurs comme le nylon chargé en graphite ou le métal.

Le porte filtre s'adapte sur la partie inférieure du cyclone et doit permettre un serrage homogène exempt de fuites sur le pourtour du filtre. L'utilisation de cassettes porte-filtre d'ouverture 4.1 mm permet d'assurer cette condition.

Le système d'aspiration utilisé pour le dispositif de prélèvement est une pompe volumétrique compacte, portable, autonome sur une durée de 8 heures, à débit régulé. La pompe doit être capable de réaliser, compte tenu de la perte de charge du filtre et pendant toute la durée du prélèvement, le débit préconisé. Selon les modèles de cyclone utilisés, les débits de prélèvement varient de 1,7 à 10 L.min⁻¹ (voir Annexe 1). Ce type de dispositif est sensible aux variations de pression qui influent sur les diamètres de coupure des particules prélevées.

Les filtres pouvant être utilisés dans les porte-filtres sont de nature variée : nitrate de cellulose, fibres de quartz, fibres de verre, téflon (PTFE), PVC, ester de cellulose. Il est recommandé d'utiliser des filtres plutôt hydrophobes afin de s'affranchir des artefacts de pesées liées à l'humidification des filtres pendant le prélèvement.

La mesure de concentration se fait par pesée des filtres avant et après le prélèvement.

Lors de la manipulation des cyclones pendant le prélèvement, l'axe de l'orifice d'entrée du cyclone doit être maintenu dans la position horizontale orientée vers l'avant afin d'éviter la collecte de particules > 10 µm.

La pente de la courbe d'efficacité d'échantillonnage d'un cyclone dépend de ses paramètres géométriques. Le débit du cyclone est un paramètre permettant de modifier le diamètre de coupure sans influencer de manière sensible sur la pente de la courbe.

Les dispositifs utilisant des cyclones permettent de prélever entre 0,5 et 10 mg.m⁻³ de poussières. La comparaison des masses et les biais pour les deux types de cyclones Higgins-Dewell et Dorr-Oliver sont donnés dans Lidén *et al.*, 1993. Les masses sont estimées à partir d'une simulation numérique prenant les valeurs expérimentales comme données initiales. Les simulations des performances sont évaluées en air calme ou avec des vitesses d'air faibles. Les auteurs montrent l'influence de la variation de débit sur les diamètres de coupure (D₅₀). La comparaison des biais sur les masses prélevées pour différents cyclones sont données dans Lidén et Kenny, 1993, cependant les masses prélevées ne sont pas mentionnées.

Le protocole NIOSH 0600 préconise de ne pas prélever plus de 2 mg / filtre afin d'éviter le colmatage des filtres et les pertes de charges. Plusieurs échantillonnages successifs de temps plus courts sont préconisés afin d'atteindre une durée de prélèvement de 8 heures et de limiter le prélèvement à une masse inférieure à 2 mg / filtre (NIOSH 0600 et HSE MDHS 14-4). Les limites de quantification données dans les protocoles dépendent des débits de prélèvement et des supports utilisés (voir Annexe 1).

Il existe plusieurs modèles de cyclones, les modèles couramment utilisés sont les cyclones Dorr Oliver et Higgins Dewell. Seuls 5 modèles de cyclones sont décrits dans les protocoles, leurs caractéristiques et performances sont détaillées ci-dessous :

Cyclone 10 mm nylon Dorr Oliver

Le cyclone 10 mm nylon Dorr Oliver (DO) est utilisé dans les protocoles MétroPol 278, INSHT MTA-MA-014/A11, OSHA PV 2121 et NIOSH 0600.

La mise en œuvre du dispositif utilisant le cyclone 10 mm nylon Dorr Oliver est décrite dans la norme NF X 43-259 relative aux prélèvements de l'air sur les lieux de travail et mentionnée dans la norme FD CEN/TR 15230 pour l'échantillonnage de la fraction alvéolaire.

Le sélecteur de particules (le cyclone) comprend un orifice de captage de 2,5 × 2,5 mm, une partie centrale correspondant au corps du cyclone dans laquelle l'aérosol capté est introduit tangentiellement, un réceptacle à grosses particules en partie inférieure et un dispositif d'accouplement au système porte-filtre devant recueillir les particules plus fines non collectées dans le cyclone. Le corps du cyclone est en plastique non conducteur. Ce dispositif est équipé d'une cassette fermée 3 pièces : sélectionneur de particules, cassette et couvercle avec sortie reliée à la pompe. Le porte-filtre est adapté aux diamètres des filtres généralement de 25 ou 37 mm pour l'ensemble des dispositifs.

Pour les conditions d'application de la norme NF X 43-259, le débit de pompe doit être égal à 1,7 L.min⁻¹ avec un seuil de tolérance de ±5%. La variation du débit ne doit pas dépasser cette tolérance au cours de l'échantillonnage.

L'efficacité de prélèvement du dispositif Cyclone DO a fait l'objet de plusieurs études expérimentales en chambre ou en tunnel aéraulique en atmosphère contrôlée comparant ses performances vis-à-vis de la convention alvéolaire à partir des courbes d'efficacité d'échantillonnage, du diamètre de coupure D₅₀ ou de cartes de biais (Gautam *et al.*, 1997 ; Chen *et al.*, 1999; Tsai *et al.* 1999 ; Görner *et al.*, 2001 détaillées en Annexe 3.1).

Ce préleveur est connu pour les biais associés à l'efficacité d'aspiration, à l'orientation de l'embout de prélèvement (Kar *et al.*, 1995 ; Gautam *et al.*, 1997) et aux effets de charges électrostatiques (Tsai *et al.*, 1999).

A partir de carte de biais établie à partir d'essais dans un tunnel aéraulique (vitesse d'air de 0,15 m.s⁻¹) pour des tailles d'aérosol de MMAD 1 à 25 µm (pas de 1 µm) et d'écart type géométrique de 2 à 3,5 (pas de 0,25), l'efficacité d'échantillonnage des particules permet un prélèvement de 50% des particules au diamètre de coupure D₅₀ = 3,54 µm en utilisant un débit de 1.7 L.m⁻¹ avec un biais compris entre -10 et + 10% (BPC - Bias Performance Criterion) dans 49% des cas (Fiche INRS MétroPol cyclone). L'optimisation du débit de 1,5 L.min⁻¹ a permis d'améliorer les performances du cyclone DO vis-à-vis de la convention alvéolaire (Görner *et al.*, 2001 ; Lidén & Kenny (1993) ; Gautam *et al.*, 1997) :

- D₅₀ = 4,16 µm et biais compris entre -10 et + 10% dans 84 % des cas (Görner *et al.*, 2001) pour une vitesse d'air calme (0,15 m.s⁻¹). Le biais le plus important est compris entre -20 et -10 % pour les tailles de particules suivantes : 12 ≤ MMAD ≤ 16 µm et GSD = 2 ; 16 ≤ MMAD ≤ 25 µm et GSD = 2,25 ; 21 ≤ MMAD ≤ 25 µm et GSD = 2,5 ;
- D₅₀ = 3,60 µm et biais moyen : 7,5% (Gautam *et al.*, 1997) pour une vitesse d'air de 1,52 m.s⁻¹. Les écarts à la convention par lecture graphique varient de -28% à +8%. Pour les vitesses d'air plus élevées et pour les différentes orientations, une sous-estimation de la fraction alvéolaire est plus importante : biais moyen variant de -21,1% à -28,9%.

En effet, pour un débit de prélèvement de $1,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, la concentration en particules est sous-estimée pour une valeur de MMAD (mass median aerodynamic diameter) supérieure à $4 \mu\text{m}$ (Fiche INRS MétroPol cyclone). La nature des particules prélevées induit un écart à la valeur D_{50} inférieur à 5 %. Le débit de $1,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ est maintenu pour des raisons d'harmonisation. Lidén & Kenny (1993) ont modélisé l'efficacité de collecte à partir de données expérimentales et fournissent des cartes de biais au débit habituellement considéré de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Pour un aérosol de MMAD compris entre 1 et $30 \mu\text{m}$, le débit est optimisé à $1,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ et le biais moyen résiduel est inférieur à 0,5%.

La vitesse d'air et l'orientation du cyclone DO influencent également ses performances vis-à-vis de la convention alvéolaire. Une orientation de 90° et 180° conduit au prélèvement de particules dont les diamètres de coupure sont plus faibles et une augmentation du biais. Cela est également observé à des vitesses d'air plus élevées (Gautam *et al.*, 1997).

L'effet du dépôt de particules dans le cyclone DO sur l'efficacité de collecte a été testé sur des particules modèles de nature diverse (fluorescéine d'ammonium solide, tartrate de sodium et de potassium, bleu de méthylène, chlorure de sodium, dioctyl phtalate) et dont la taille varie entre 1 et $10 \mu\text{m}$ (Tsai *et al.*, 1999, Chen *et al.*, 1999). Les auteurs montrent que la pénétration des particules diminue avec l'augmentation de la charge en particules déposées dans l'embout du cyclone (phénomène d'impaction des particules). Chen *et al.*, 1999 montrent que l'efficacité de collection diminue de manière significative de 50 à 30 % au bout de 3 heures d'échantillonnage uniquement pour des particules de tartrate de potassium et de sodium de taille $\sim 4 \mu\text{m}$ dans des conditions de prélèvement en air sec et de concentration en particules de l'air ambiant de $\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pour d'autres conditions de prélèvement, l'écart d'efficacité de collecte n'excède pas les 10%. Tsai *et al.*, 1999 montrent que l'efficacité de pénétration des particules dans le préleveur peut diminuer jusqu'à 45% lorsque l'embout du cyclone est chargé en particules, en particulier pour les particules de taille $\sim 4 \mu\text{m}$. La charge en particules influe également sur le diamètre de coupure, qui peut fluctuer de $\pm 12\%$. Les auteurs précisent que cet effet peut être compensé par l'adaptation du débit de prélèvement comme indiqué précédemment ou l'augmentation de l'ouverture de l'embout.

Le dispositif Cyclone DO a fait l'objet de plusieurs études expérimentales comparant ses performances vis-à-vis de la convention alvéolaire à partir des courbes d'efficacité d'échantillonnage, du diamètre de coupure D_{50} ou de cartes de biais.

Des écarts à la courbe conventionnelle sont observés avec une surestimation pour les particules de diamètre inférieur à $4 \mu\text{m}$ et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et $10 \mu\text{m}$.

L'influence des vitesses d'air, de l'orientation du dispositif, du dépôt sur les parois, de l'humidité relative et du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol ont été étudiés : des vitesses d'air élevées, une orientation de 90° et 180° , le dépôt sur les parois et la charge électrostatique des particules notamment de diamètre proche du diamètre de coupure de $4 \mu\text{m}$ ainsi qu'une augmentation de l'humidité relative de 10 à 80% amènent une baisse de ses performances par augmentation du biais sur l'efficacité de collecte. Il n'y a pas de différence observée pour différents aérosols et différentes concentrations d'un même type d'aérosol.

Pour une meilleure comparaison à la fraction conventionnelle alvéolaire, il est recommandé de réaliser un prélèvement au débit optimisé de $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (Gautam *et al.*, 1997; Görner *et al.*, 2001) conduisant à de meilleures performances dans différentes conditions environnementales.

Cyclone en Aluminium

Le cyclone en Aluminium (Al Cyclone ou dust cyclone) est cité dans la liste des échantillonneurs proposés dans la norme FD CEN/TR 15230 et préconisé dans le protocole NIOSH 0600.

Le cyclone en aluminium est une variante du cyclone DO, conçu pour pallier au biais d'échantillonnage dû aux charges électrostatiques. Le corps du cyclone est en aluminium et son débit de prélèvement de $2,67 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ pour obtenir un diamètre de coupure D_{50} de $4 \mu\text{m}$ (Chen *et al.*, 1999). Le diamètre de coupure D_{50} varie de $3,85$ à $4,24 \mu\text{m}$ en fonction du débit de prélèvement mais également du dépôt sur les parois et charge électrostatique (Tsai *et al.*, 1999).

Les préconisations du protocole NIOSH 600 sont identiques à celles données pour le cyclone Dorr Oliver. L'utilisation d'un filtre PVC (porosité $5 \mu\text{m}$), avec un temps de collecte maximal de 4 h (pour un empoussièrément maximal de $5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) est recommandé. La gamme de masse de collecte estimée est alors de $0,1$ à 2 mg par échantillon avec une limite de détection de $0,03 \text{ mg}$ soit des limites supérieures de prélèvements comprises entre $0,17$ et $3,33 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour 4 heures de prélèvement en continu (avec une LD de $0,05 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Les biais et précisions dépendent de la distribution en taille des particules à prélever.

Le dispositif Cyclone AI a fait l'objet de plusieurs études expérimentales en chambre ou en tunnel aérodynamique comparant ses performances vis-à-vis de la convention alvéolaire (Chen *et al.*, 1999 ; Tsai *et al.*, 1999 ; Görner *et al.*, 2001 détaillées en Annexe 3.3). Ces études indiquent que des écarts à la courbe conventionnelle avec une sur-estimation pour les particules de diamètre inférieur à $4 \mu\text{m}$ et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et $10 \mu\text{m}$. Au débit de $2,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, le biais vis-à-vis de la convention alvéolaire est compris entre -10 et $+10\%$ dans 86% des cas ; le biais le plus important est compris entre -20 et -10% à partir de particules de taille supérieure à $12 \mu\text{m}$ (Görner *et al.*, 2001).

L'influence du dépôt sur les parois et du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol n'amènent pas de baisse de ses performances (Tsai *et al.*, 1999). L'étude de Chen *et al.*, 1999 montre une différence d'efficacité avec une sur-estimation pour les particules de diamètre compris entre 4 à $7 \mu\text{m}$ indiquant un dépôt sur les parois avec un équilibre atteint tardivement entre le dépôt et le réentrainement de l'aérosol.

Cyclones GS-1/GS-3

Les cyclones GS-1/GS-3 sont listés dans la norme FD CEN/TR 15230 sous l'appellation « *conductive plastic cyclone* ». Ce type de dispositif a été développé avec 3 entrées d'air « *Multi-inlet cyclone sampler* » afin de pallier aux inconvénients du cyclone Dorr Oliver notamment les biais d'échantillonnages dus aux effets de charge et à l'orientation du cyclone (mono-entrée). Le corps du cyclone est en plastique conducteur, les cassettes ouvertes deux pièces sont adaptables, le débit de fonctionnement est de $2,75 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ pour le GS 3 et $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ pour le GS1 afin d'obtenir un diamètre de coupure $D_{50} \sim 4 \mu\text{m}$.

Deux études expérimentales en tunnel aérodynamique ont évalué l'efficacité de collecte du dispositif GS 3 (Gautam *et al.*, 1997; Chen *et al.*, 1999 détaillées en Annexe 3.4).

Les performances du cyclone GS3 sont décrites par Gautam *et al.*, 1997 et comparées à celles du cyclone Dorr Oliver. Les tests ont été effectués avec 4 débits d'échantillonnage ($2,3$ à $2,6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) et différentes conditions de vitesse d'air élevées ($1,52$; $2,43$ et $4,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) avec des particules de charbon (coal dust) d'un diamètre aérodynamique médian (MMAD) de $3,5 \mu\text{m}$ ($\pm 2 \mu\text{m}$). L'effet de l'orientation du préleveur et de la vitesse de vent ont été testés. Les résultats mettent en évidence les meilleures performances au regard de la fraction conventionnelle au débit de $2,5$ et $2,6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. L'efficacité de collecte des particules est conforme aux conventions CEN-ISO-ACGIH avec une valeur de D_{50} comprise entre $3,86$ et $3,58 \mu\text{m}$ pour un biais moyen variant de $-8,78\%$ à $-0,81\%$.

Le dépôt de particules sur les parois induit une diminution de l'efficacité de collecte après 3 heures d'exposition qui est d'autant plus importante pour les diamètres de 2 à $5 \mu\text{m}$. Une surestimation après 3 heures est observée pour la concentration la plus élevée (Chen *et al.*, 1999).

Amran *et al.*, 2016 ont évalué l'influence de la taille des filtres de PVC (porosité $5 \mu\text{m}$) pour la collecte de poussières de silice par le cyclone GS3 dans des carrières. Les auteurs montrent que les

concentrations minimales et maximales collectées sur les filtres 25 mm et 37 mm sont respectivement 0,02 - 1,77 mg.m⁻³ et 0,07 - 1,07 mg.m⁻³ pour 8 heures de collecte dans les différentes conditions de prélèvement. Les moyennes géométriques et arithmétiques calculées pour l'ensemble des prélèvements sont comparables pour les filtres 25 ou 37 mm. Les auteurs concluent à une bonne conformité des deux types de filtres pour le prélèvement des poussières de silice en milieu professionnel.

Le protocole HSE MDHS 14-4 préconise l'utilisation du cyclone GS3 pour la collecte de la fraction alvéolaire. Les conditions de prélèvement préconisées sont identiques à celles décrites pour le cyclone Dorr Oliver.

La courbe d'efficacité du dispositif GS3 présente des écarts à la courbe conventionnelle avec une surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre supérieur à 4 µm.

Ce dispositif a été testé pour des vitesses d'air élevées (> 1 m.s⁻¹) et présente un biais moyen variant de -10,13 à -1,43%. Il n'a pas été étudié à des vitesses d'air calme. Une augmentation du biais est mise en évidence pour la vitesse d'air de 4,15 m.s⁻¹. Aucune influence de l'orientation du dispositif n'est observée.

Il présente également de meilleures performances par rapport à la courbe conventionnelle à des concentrations élevées.

Cyclone Higgins Dewell

Le cyclone Higgins Dewell (HD) est utilisé dans les protocoles IFA 6068, DFG MAK, NIOSH 0600, HSE MDHS 14-4.

Le cyclone Higgins Dewell est conçu pour collecter les particules alvéolaires dont le diamètre de coupure est de 4 µm (D₅₀) et un accord optimal à la convention alvéolaire lorsqu'il est utilisé avec une pompe d'un débit de 2,2 L.min⁻¹(HSE MDHS 14-4). Il est recommandé au Royaume Uni pour la collecte de la fraction alvéolaire répondant aux normes ISO 7708 :1995 et BS EN 481 :1993.

Le corps du cyclone est constitué d'un matériau plastique anti-statique. Le cyclone peut renfermer une cassette dans la même matière, contenant le filtre posé sur grille métallique, ou être adapté à un porte filtre cassette ouverte constituée de 2 pièces. Le porte-filtre est adapté aux diamètres des filtres de 25 ou 37 mm. La détermination de la concentration en particules s'effectue par pesée de filtre.

Pour ce type de préleveur, il est recommandé de peser ensemble le filtre et la cassette. Le guide FD CEN/TR 15230 répertorie trois références de cyclones HD : SIMPEDS, FSP2 avec un débit de 2,2 L.min⁻¹ et FSP10 avec un débit de 10 L.min⁻¹. Le diamètre de coupure est alors de 4,8 µm lorsque le débit de pompe est de 10 L.min⁻¹.

Plusieurs dispositifs Cyclone HD, de géométries différentes, ont été étudiés dans des conditions expérimentales en chambre ou en tunnel aérodynamique en atmosphère contrôlée comparant ses performances vis-à-vis de la convention alvéolaire (Görner *et al.*, 2001, Lee *et al.*, 2010 détaillées en Annexe 3.5). Ils se distinguent notamment par le débit d'échantillonnage propre à chaque référence et dépendant du diamètre interne du tube sélecteur¹⁷ à l'inverse des dispositifs cyclones DO qui ont la même géométrie et donc le même débit :

- SIMPEDS, FSP2, Casella plastic, SKC plastic cyclone, BGI4L à bas débit ;

¹⁷ B. BELLE « Evaluation of gravimetric sample bias, effect on measured concentration, and proposal for the use of harmonised performance based dust sample for exposure assessment » Int. Journal of Mining Science and Technology, 2019 (29), 445-452.

- FSP10 à haut débit.

Ces 2 études mettent en évidence une surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm en air calme.

En air calme (0,15 m.s⁻¹), le biais de 2 dispositifs au débit de 1,9 L.min⁻¹ vis-à-vis de la convention alvéolaire est compris entre -10 et + 10% dans 68% et 58% des cas. A partir des cartes de biais, il est observé que le biais le plus important est compris entre -20 et -10% à partir de particules de taille supérieure à 7 µm au débit de 1,9 L.min⁻¹ (Görner *et al.*, 2001) et pouvant atteindre plus de - 40% au débit de 2,2 L.min⁻¹ pour des particules de tailles supérieures à 10 µm (NIOSH, 1998). Lidén & Kenny, 1993, ayant modélisé l'efficacité de collecte à partir de données expérimentales, ont optimisé le débit à 2,1 L.min⁻¹ avec un biais moyen résiduel inférieur à 0,5% pour le cyclone HD SIMPEDS. Le fabricant SKC propose un débit optimisé de 3 L.min⁻¹ avec un biais le plus important compris entre +10 et +20% pour des particules de taille supérieure à 14 µm (SKC, 2018).

L'étude de Lee *et al.* (2010) réalisée en chambre expérimentale à vitesse d'air calme et sur plusieurs types d'aérosol, indique que l'écart à la convention est plus important pour le dispositif FSP 10 au débit de 10 L.min⁻¹ : biais déterminé par lecture graphique variant de -100% à 22%. Une surestimation de la fraction alvéolaire de 40% par rapport à la fraction conventionnelle a été estimée par Lee *et al.*, 2010 dans ces conditions d'utilisation. L'échantillonneur FSP10 surestime la fraction comprise entre 1 et 5,5 µm. Selon les auteurs, ces performances peuvent être améliorées en augmentant le débit de prélèvement à 11,2 L.min⁻¹. Toutefois, les auteurs précisent que les performances des FSP10 ont été évaluées en air calme et sont différentes quand les tests sont réalisés en tunnel.

Ce type de dispositif présente des performances différentes selon le débit employé. Une optimisation du débit propre à chaque dispositif est proposée pour une meilleure comparaison à la fraction conventionnelle alvéolaire. Les données disponibles ne concernent que des vitesses d'air calmes sans études de l'orientation du dispositif (positionnement du préleveur face, perpendiculaire ou dos au flux d'air), ni l'influence de l'humidité relative et ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol.

Cyclones GK2.69 et GK 4.162

Plusieurs dispositifs Cyclones GK ont été étudiés dans des conditions expérimentales se distinguant par le diamètre d'entrée (1,52 cm, 2,69 ; 3,45 ou 4,162 cm) ainsi que le débit d'échantillonnage adaptable selon la fraction conventionnelle visée. Seul le GK 2.69 est présent dans la liste des échantillonneurs proposés dans la norme FD CEN/TR 15230, il est préconisé dans le protocole HSE MDHS 14-4. Le système a été décrit par Kenny *et al.*, 1991.

Le corps du cyclone GK est en inox afin d'éviter les effets dus aux charges électrostatiques. Les cassettes ouvertes 2 pièces 37 mm sont adaptables sur ces cyclones. Les cyclones GK sont classés (comme le FSP 10) dans la catégorie des « cyclones à haut débit ». Le GK 2.69 est optimisé pour un débit à 4,4 L.min⁻¹ (D₅₀ ~4,2 µm) (Kenny & Gussman, 1997 ; Lee *et al.*, 2010) et le GK 4.162 à 9 L.min⁻¹ (D₅₀ = 3,91±0,07 µm) (Thorpe, 2011).

Le protocole HSE MDHS 14-4 préconise l'utilisation du cyclone GK 2.69 pour la collecte de la fraction alvéolaire et cite le dispositif GK 4.162 comme dispositif à haut débit. Les conditions de prélèvement préconisées sont identiques à celles décrites pour le cyclone Dorr Oliver, soit l'utilisation d'un filtre en PVC.

Les performances du GK 2.69 sont décrites dans les études de Kenny et Gussman, 1997, Lee *et al.* (2010), Metropol Cyclone (2019) et celles du dispositif GK 4.162 dans Thorpe (2011) à partir d'essais en chambre expérimentale à vitesse d'air calme détaillées en Annexe 3.6 .

Des écarts à la courbe conventionnelle sont observés avec une surestimation pour les particules de diamètre inférieur ou égal à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre compris entre 4 et 10 µm : biais déterminé graphiquement pour un débit de 4,2 L.min⁻¹ variant de -58% à 25% (Kenny & Gussman, 1997, MétroPol, 2019). Lee *et al.* (2010) au même débit mettent en évidence une surestimation pour des particules de tailles supérieures à 6 µm. Une optimisation du débit à 4,4 L.min⁻¹ est proposée dans ces études réduisant l'écart à la courbe conventionnelle : biais déterminé graphiquement variant de -26% à + 15% (Lee *et al.*, 2010).

Pour le dispositif GK 4.162, une optimisation du débit à 8,5 ou 9 L.min⁻¹ est proposée dans l'étude de Thorpe (2011) avec une carte de biais présentant un biais inférieur à ± 10% pour toutes les tailles de particules. Des débits plus faibles entraînent une surestimation de la fraction conventionnelle avec un biais pouvant atteindre plus de 30% à 7 L.min⁻¹. Des débits plus élevés engendrent une sous-estimation de la fraction conventionnelle pour des particules de taille supérieure à 6 µm.

Aucune donnée n'est disponible sur l'influence de vitesses d'air élevées, de l'orientation du dispositif (positionnement du préleveur face, perpendiculaire ou dos au flux d'air), de l'humidité relative et du type, de la concentration et charge électrostatique de l'aérosol.

4.5.1.2 Description et performances du dispositif utilisant une coupelle rotative (CIP10-R)

Le dispositif de prélèvement de la fraction alvéolaire utilisant une coupelle rotative est décrite dans la norme NF X 43-262, FD CEN/TR 15230 et utilisé dans le protocole INRS MétroPol M-281.

Le principe du dispositif est décrit par Courbon *et al.*, 1988, il consiste à mettre en rotation à grande vitesse une coupelle à l'intérieur d'une cavité cylindrique. Le mouvement génère une dépression qui elle-même génère le débit de prélèvement. Dans le dispositif à coupelle rotative, l'aérosol ambiant est aspiré au niveau d'un orifice ou d'une fente, traverse un étage sélecteur, puis pénètre à l'intérieur d'une coupelle garnie d'un substrat chargé de retenir les particules (en général une mousse polyuréthane - PUF). La coupelle contenant les particules collectées est ensuite pesée.

Pour les préleveurs de la fraction alvéolaire, le débit nominal est de 10 L.min⁻¹. Les paramètres jouant sur le débit sont : le colmatage du sélecteur, la masse des particules collectées dans la coupelle, la dérive de l'électronique liée à la température et la viscosité cinématique de l'air (fonction de la température et de la pression).

La limite de quantification donnée dans le protocole MétroPolM-281 est de 0,125 mg.m⁻³.

D'après la norme NF X 43-262 décrivant cette méthode de prélèvement d'aérosols : « *Le présent document ne s'applique pas aux aérosols composés majoritairement de particules de diamètre aérodynamique < 2 µm (fumées de soudage, nanoparticules, etc.). La méthode reste applicable dans un nombre important de situations car les particules fines ne constituent qu'une faible part pondérale* ».

Le dispositif CIP-10-R a fait l'objet de plusieurs études expérimentales en chambre ou tunnel aéraulique en atmosphère contrôlée comparant ses performances vis-à-vis de la convention alvéolaire qui confirment la sous-estimation des particules de diamètre inférieur à 2 µm (Courbon *et al.*, 1988; Görner *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2010 ; MétroPol CIP 10, 2016 détaillées en Annexe 3.8 Annexe 3.7).

Il a été montré que le CIP10-R sous-estimait la collecte des particules dans la gamme 1-2,5 µm et surestimait légèrement les particules > 2,5 µm et ce, pour différentes natures de particules (poussières de charbon, aloxite 50, oxydes d'aluminium, kaolin, Air Cleaner fine test dust) (Lee *et al.*, 2010).

En air calme ($0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), le biais vis-à-vis de la convention alvéolaire est compris entre -10 et + 10% dans 81% des cas. A partir des cartes de biais, il est observé que le biais le plus important est compris entre -20 et -10% à partir de particules de taille inférieure à $9 \mu\text{m}$ au débit de $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (Görner *et al.*, 2001).

Le protocole MétroPolM-281 préconise l'utilisation de mousse polyuréthane en spécifiant les conditions de conditionnement des mousses avant échantillonnage. Le temps d'échantillonnage n'est pas mentionné et une valeur limite de quantification est donnée à $0,125 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Des écarts à la courbe conventionnelle sont observés avec une sous-estimation pour les particules de diamètre inférieur à $2 \mu\text{m}$ et une surestimation pour les particules de diamètre supérieur à $2 \mu\text{m}$. Des différences de performances sont observées en fonction du type et de la concentration de l'aérosol.

Aucune étude n'a porté sur des vitesses d'air élevées ni sur différentes orientations du dispositif.

4.5.1.3 Synthèse des performances des dispositifs de prélèvement vis-à-vis de la fraction conventionnelle alvéolaire

La plupart des études expérimentales ont évalué ces dispositifs avec des aérosols de granulométrie allant jusqu'à environ $10 \mu\text{m}$ et pour des vitesses d'air allant de $0,15$ à $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

A des vitesses d'air calme (de l'ordre de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ voire inférieures), cas le plus courant dans les atmosphères de travail (Baldwin *et al.*, 1998) :

- les dispositifs cyclones de type DO, HD, GK surestiment la fraction conventionnelle pour les particules de diamètre inférieur à $4 \mu\text{m}$ et sous-estiment la fraction conventionnelle pour les particules de diamètre supérieur à $4 \mu\text{m}$;
- le CIP-10-R sous-estime la fraction conventionnelle pour les particules de taille inférieure à $2 \mu\text{m}$;
- le cyclone GS 3 n'a pas fait l'objet d'étude expérimentale en air calme.

A des vitesses d'air plus élevées (1 à $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) :

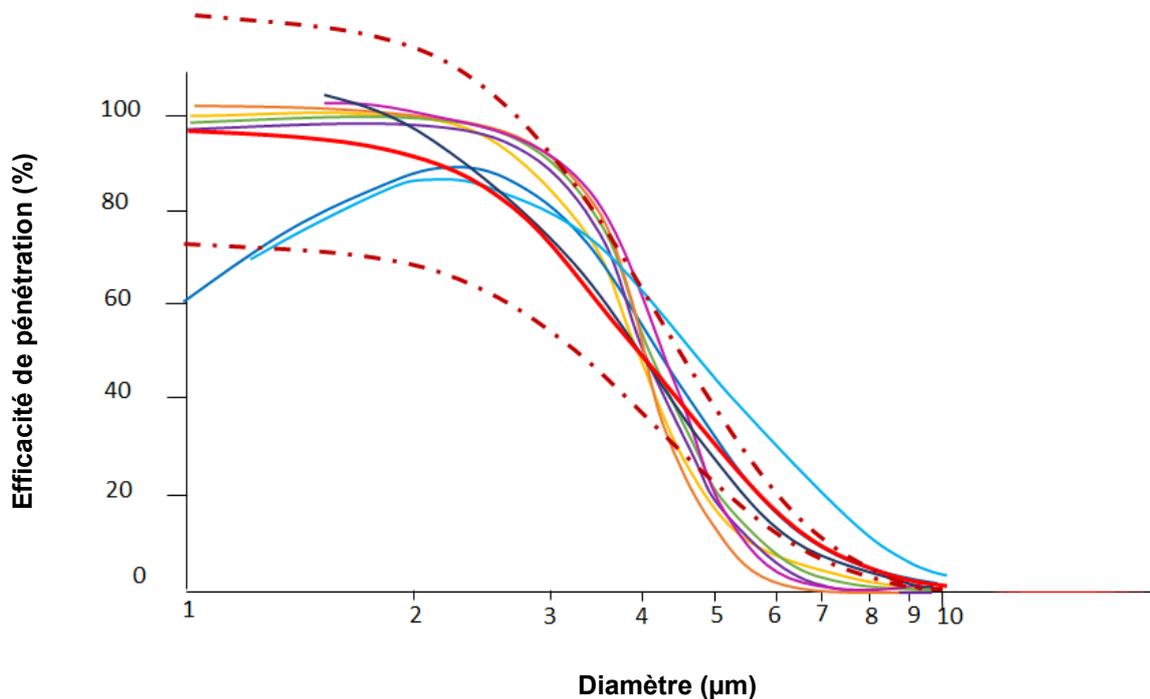
- la sensibilité du dispositif cyclone DO à la vitesse d'air, à l'orientation par rapport au flux d'air (face, perpendiculaire ou opposé) a été étudiée. Plus la vitesse d'air est élevée, plus l'efficacité de prélèvement diminue pour le cyclone DO avec pour conséquence un biais négatif plus important par rapport à la courbe conventionnelle. Des orientations de 90 et 180° ont amené également un sous-échantillonnage de la fraction alvéolaire (diamètres de coupure plus faibles et augmentation du biais) ;
- le dispositif cyclone de type GS3 étudié uniquement pour des vitesses d'air élevées présente de meilleures performances d'efficacité vis-à-vis de la fraction alvéolaire et n'est pas sensible à l'orientation du dispositif. Plus la vitesse d'air augmente, plus le biais augmente avec un sous-échantillonnage de la fraction alvéolaire ;
- les dispositifs cyclones de type HD, GK et le dispositif CIP-10-R n'ont pas fait l'objet d'étude expérimentale à des vitesses d'air élevées.

L'effet du dépôt sur les parois et des charges électrostatiques ont été étudiées pour les dispositifs de type cyclone DO et GS. Le cyclone DO est également très sensible à ces facteurs et conduit à une efficacité de captage plus faible.

L'étude de Görner *et al.*, 2001 a comparé les performances de collecte de 15 échantillonneurs dont 11 dispositifs utilisant des cyclones. Les performances concernant les diamètres de coupure ont été évaluées en air calme sur des poussières de charbon polydispersées. Les auteurs montrent que $\pm 1 \mu\text{m}$ sur le diamètre de coupure à 50% (D_{50}) peut être raisonnablement accepté. Par ailleurs, ils montrent que le diamètre de coupure à 50% peut être amélioré en adaptant le débit de pompe pour la plupart des dispositifs. Toutefois, plus le débit est faible plus il est difficile de l'adapter. Dans l'ensemble, les dispositifs montrent un critère de performance sur la précision de collecte supérieur à 80% à l'exception du dispositif Higgins Dewell. Toutefois, les auteurs précisent que les performances des différents préleveurs sont évaluées sur des particules modèles, ces performances peuvent différer selon le type d'aérosols échantillonné (nature, forme, distribution granulométrique) et les conditions d'échantillonnages (humidité, réentraînement, etc.). Ainsi, ils recommandent l'utilisation systématique des cartes de biais et de précisions afin de pouvoir estimer le sur- ou sous-échantillonnage.

L'étude de Lee *et al.* (2010) a également comparé les performances de 3 dispositifs en air calme sur différents types d'aérosols.

A partir de données de ces 2 études comparant les performances des dispositifs de prélèvement par rapport à la fraction conventionnelle alvéolaire, la Figure 7 représente les courbes d'efficacité de prélèvement pour les particules de diamètre compris entre 1 et 10 μm . Elle permet de comparer les performances de 8 échantillonneurs dans des conditions environnementales normales.



Légende:

- Convention CEN-ISO-ACGIH (écart de $\pm 25\%$ - . -)
- Dorr-Oliver cyclone (DO) Débit = 1,5 L.min⁻¹
- SKC Al cyclone (Al) Débit = 2,2 L.min⁻¹ (Gorner et al. 2001)
- SKC Plastic cyclone (HD) Débit* = 1,9 L.min⁻¹ (Gorner et al. 2001)
- Casella Plastic cyclone (HD) Débit* = 1,9 L.min⁻¹ (Gorner et al. 2001)
- CIP-10R Débit = 10 L.min⁻¹ (Gorner et al. 2001)
- CIP-10R Débit = 10 L.min⁻¹ (Lee et al. 2010)
- GK 2.69 cyclone (GK) Débit = 4,4 L.min⁻¹ (Lee et al., 2010)
- FSP 10 cyclone (HD) Débit = 11,2 L.min⁻¹ (Lee et al. 2010)

NB : Les courbes d'efficacité ont été reprises des articles référencés qui ont été superposées dans cette figure avec une mise à la même échelle. Les débits marqués d'une étoile ne correspondent pas aux débits optimisés.

Figure 7 : Comparaison de l'efficacité de différents préleveurs vis-à-vis de la convention alvéolaire à vitesse d'air calme

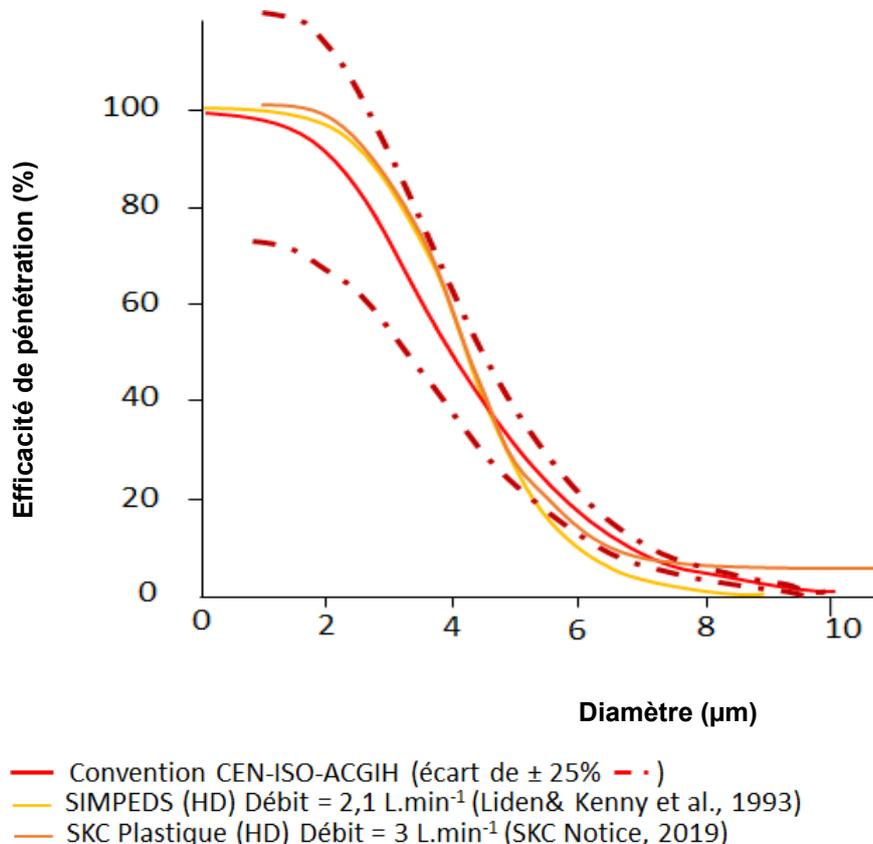


Figure 8 : Comparaison de l'efficacité de 2 cyclones HD aux débits optimisés vis-à-vis de la convention alvéolaire à vitesse d'air calme

4.5.1.4 Comparaison de dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire

Plusieurs études ont comparé les concentrations mesurées par différents dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire dans des conditions expérimentales ou sur le terrain.

Il n'a pas été réalisé de recherche bibliographique exhaustive de ce type d'études qui n'ont généralement pas pour but de comparer l'efficacité des échantillonneurs vis-à-vis de la convention,

mais de comparer leur efficacité entre eux. Toutefois, parmi les études identifiées lors de la requête bibliographique visant à documenter l'efficacité de prélèvement vis-à-vis de la fraction alvéolaire (Cf.4.5.1), certaines études ont été retenues car apportant un éclairage sur le comportement de ces échantillonneurs sur le terrain.

La plupart des études reposent sur une comparaison par paire en considérant un dispositif de référence, principalement les dispositifs de type cyclone DO ou HD. Les données fournies sont soit des ratios de concentration ou de masse prélevée entre le dispositif de référence et l'autre dispositif soit l'analyse de la relation linéaire entre les concentrations mesurées par les 2 dispositifs comparés. Il peut également s'agir de comparaison de plusieurs dispositifs à partir de la concentration médiane issue des différentes mesures (Verpaele *et al.*, 2013) ou d'études spécifiques sur les facteurs influençant les performances d'échantillonnage comme l'effet de charges électrostatiques et l'importance de la calibration du blanc de terrain pour les dispositifs de type cyclone HD (FSP 2 et 10) (Hu *et al.*, 2014). Les données issues de ces études sont regroupées dans l'Annexe 3.8 .

Les études comparatives de Lee *et al.* traitant des performances des préleveurs à haut débit (CIP10, GK2.69 et FSP10), démontrent que ces dispositifs prélèvent des quantités plus élevées que les dispositifs à faible débit de type DO ou HD (BGI4L) (Lee *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2016) avec des ratios plus élevés par rapport au cyclone DO qu'avec le cyclone HD. A partir de la relation linéaire, les résultats des études de Stacey *et al.* (2014 ; 2016) montrent des résultats comparables avec une déviation de l'ordre de 12% issues de ces dispositifs à haut débit comparativement au cyclone HD (SIMPEDS). Il ressort que le dispositif CIP10 a un écart plus important sur les particules de petite taille.

L'étude comparative de Verpaele *et al.*, 2013, réalisée en environnement de travail pour déterminer l'exposition aux poussières de quartz (industrie produisant de l'émail, fabrication de poudres de quartz et de cristobalite, fabrication de briques), met en évidence que les performances des systèmes de collection dépendent principalement de la distribution granulométrique des particules à prélever.

Les valeurs de concentrations obtenues avec différents préleveurs cyclones (DO, HD) et CIP10-R ont été comparées à la valeur de concentration médiane pour les particules ultrafines : elles sont inférieures pour les dispositifs cyclone DO, cyclone HD BCIRA et CIP10-R et supérieures pour les dispositifs HD (SKC PC, PVC et SIMPEDS). Des différences significatives sont observées entre certains dispositifs mais pas pour l'ensemble des prélèvements de terrain. Les performances du cyclone DO sont affectées par son efficacité d'aspiration comme montré précédemment.

4.5.1.5 Conclusions sur l'efficacité des dispositifs d'échantillonnage de la fraction alvéolaire

En conclusion, sur la base des normes et protocoles existants ainsi que des études expérimentales, les différents dispositifs décrits ci-dessus présentent des efficacités d'échantillonnage variables, dépendantes de la granulométrie de l'aérosol et des conditions environnementales notamment la vitesse d'air et de l'orientation du dispositif.

Aucun dispositif de prélèvement de la fraction alvéolaire ne respecte la courbe conventionnelle dans l'ensemble des situations même si globalement l'écart à la fraction conventionnelle reste relativement faible à l'exception du CIP-10-R.

Dans les études d'évaluation des performances ou bien de comparaison de préleveurs, il manque des informations sur les masses minimales et maximales qu'il est possible de prélever et sur le comportement des dispositifs dans des niveaux d'empoussièrement variés.

Au regard de l'ensemble des données analysées et des conditions généralement rencontrées sur les lieux de travail (vitesse d'air < 0,5 m.s⁻¹), les cyclones GS-1 et la coupelle CIP-10-R sont classés

en catégorie 3 pour le critère d'évaluation « conformité à la fraction conventionnelle » et ne sont donc pas recommandés pour la mesure de la fraction alvéolaire. En effet :

- le dispositif GS-1 n'a pas fait l'objet d'études expérimentales pour évaluer ses performances ;
- l'utilisation du CIP10-R n'est pas recommandée en raison d'une faible efficacité de collecte des particules de diamètre inférieur à 2 μm .

Les dispositifs cyclones Higgins-Dewell (HD) qui se distinguent par des géométries et débits différents, Dorr-Oliver (DO), GK2.69 et 4.162, AI, GS-3 sont classés en catégorie 2 pour critère d'évaluation « conformité à la fraction conventionnelle » au regard de la convention alvéolaire. Des écarts peu importants à la courbe conventionnelle sont observés avec une surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 μm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 μm . De plus :

- les méthodes de prélèvement les plus décrites et utilisées mettent en œuvre des cyclones (HD, DO, AI, GS-3). Une optimisation du débit d'échantillonnage a été étudiée pour ces dispositifs pour une meilleure comparaison à la fraction conventionnelle alvéolaire en améliorant les performances et est recommandée dans le cadre de cette expertise (Tableau 7). Plus particulièrement, concernant le cyclone Dorr Oliver (DO), il est à noter que l'utilisation du débit de prélèvement de 1,7 L.min⁻¹ est maintenu pour des raisons d'harmonisation mais induit une sous-estimation des concentrations à partir d'un diamètre de coupure de 4 μm suite à la modification de la courbe conventionnelle. Une baisse du débit à 1,5 L.min⁻¹ permet de se rapprocher de la nouvelle courbe conventionnelle (INRS MétroPol fiche cyclone). Dans le cas d'utilisation de cassettes sensibles aux charges électrostatiques, des dépôts sur les parois sont possibles.

Il existe plusieurs modèles de cyclones Higgins Dewell HD (SIMPEDS, FSP2, Casella plastic, SKC plastic cyclone, BGI4L, FSP10). Leurs performances vis-à-vis de la fraction conventionnelle alvéolaire ont été étudiées dans des conditions de vitesses d'air calmes sans études de l'orientation du dispositif (positionnement du préleveur face, perpendiculaire ou dos au flux d'air), ni l'influence de l'humidité relative et ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol contrairement au cyclone DO ;

- les dispositifs cyclones à haut débit (FSP10, GK2.69 et GK 4.162) peuvent induire une perte de charge plus importante et peuvent être plus contraignants en raison du poids plus important de la pompe de prélèvement.

Tableau 13 : Evaluation détaillée des dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire

| Dispositif de prélèvement | | Protocoles | Caractéristiques vis-à-vis de la fraction | | Classement | Limites | | |
|---------------------------|----------------|---|---|---|------------|--|--|---|
| Cyclone DO | | MétroPol Cyclone (2019) INSHT MTA-MA014/A11 OSHA PV 2121 Niosh 0600 NF X 43-259 FD CEN 15230 Liden & Kenny (1993) Görner <i>et al.</i> , 2001 Gautam <i>et al.</i> , 1997 | D ₅₀ : 3,55 µm (pente = 1,28) si débit de 1,7 L.min ⁻¹ | Sur estimation pour des particules de tailles de 1 à 4 µm et sous-estimation pour les particules de tailles comprises entre 4 et 10 µm | 2 | ↓ D ₅₀ et ↑ Biais avec des vitesses d'air élevées et des orientations du dispositif à 90 et 180° (Kar <i>et al.</i> 1995 ; Gautam <i>et al.</i> 1997) Problématique de dépôt sur les parois, d'effet de charges électrostatiques (Chen <i>et al.</i> , 1999 ; Tsai <i>et al.</i> (1999)) | | |
| | | | D ₅₀ : 4,16 µm (pente = 1,28) si débit optimisé de 1,5 L.min ⁻¹ | | | | | |
| Cyclone AI | | Niosh 0600 FD CEN 15230 Görner <i>et al.</i> 2001 Chen <i>et al.</i> (1999) | D ₅₀ : 4,29 µm si débit de 1,7 L.min ⁻¹ | Sur estimation pour des particules de tailles de 1 à 4 µm et sous-estimation pour les particules de tailles comprises entre 4 et 10 µm | 2 | Pas d'influence du dépôt sur les parois, ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol (Tsai <i>et al.</i> 1999) | | |
| | | | D ₅₀ : 4,24 µm (pente = 1,29) si débit optimisé de 2,2 L.min ⁻¹ | | | | | |
| | | | D ₅₀ =4 µm si débit optimisé de 2,67 L.min ⁻¹ | | | | | |
| Cyclone GS1 | | MétroPol Cyclone (2019) FD CEN 15230 INSHT MTA-MA014/A11 | Pas de données pour débit de 2 L.min ⁻¹ | | 3 | | | |
| Cyclone GS3 | | MétroPol Cyclone (2019) HSE MDHD 14/4 FD CEN 15230 INSHT MTA-MA014/A11 Gautam <i>et al.</i> , 1997 Chen <i>et al.</i> 1999 | Pas de données pour débit respectif de 2,75 L.min ⁻¹ | | 3 | Pas de différence en fonction de l'orientation du dispositif ↑ Biais à une vitesse d'air très élevée Pas d'effet de dépôt sur les parois ni de charges électrostatiques (Chen <i>et al.</i> 1999) | | |
| | | | D ₅₀ : 3,80 – 3,95 µm si débit optimisé de 2,5 -2,6 L.min ⁻¹ | Sur-estimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm | 2 | | | |
| Cyclone HD | FSP 10 | IFA 6068 DFG MAK Lee <i>et al.</i> (2010) | D ₅₀ : 4,8 µm si débit de 10 L.min ⁻¹ | Sur-estimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm | 2 | Perte de charge du fait du haut débit | Pas d'études concernant des vitesses d'air élevées, ni l'influence de l'orientation du dispositif, de l'humidité relative et ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol. Préconisation de pesée filtre + cassette | |
| | SIMPEDS – FSP2 | NIOSH 0600 HSE MDHS 14/4 Görner <i>et al.</i> (2001) Liden & Kenny (1993) | D ₅₀ : 4,2 µm si débit optimisé 11,2 L.min ⁻¹ | | | 2 | | - |
| | SKC Plastic | SKC Plastic cyclone notice (2019) | D ₅₀ = 4,20 µm si débit optimisé de 3 L.min ⁻¹ | | | 2 | | - |

| Dispositif de prélèvement | | Protocoles | Caractéristiques vis-à-vis de la fraction | | Classement | Limites |
|---------------------------|----------|--|---|---|------------|---|
| Cyclone GK | GK 2.69 | HSE MDHS 14/4 FD CEN 15230 Kenny & Gussman (1997) Lee <i>et al.</i> (2010) | D ₅₀ : 4,8 µm si débit de 4,2 L.min ⁻¹ | Sur-estimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm | 2 | Pas d'études concernant des vitesses d'air élevées, ni l'influence de l'orientation du dispositif, de l'humidité relative et ni du type, concentration de l'aérosol. Perte de charge du fait du haut débit |
| | | | D ₅₀ : 4,2 µm si débit optimisé de 4,4 L.min ⁻¹ | | | |
| | GK 4.162 | Thorpe (2011) | D ₅₀ = 3,91 µm si débit optimisé de 9 L.min ⁻¹ | Sur-estimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm | 2 | |
| CIP-10 R | | MétoPol CIP10 (2016) NF X 43-262 FD CEN 15230 Courbon <i>et al.</i> 1988 Görner <i>et al.</i> 2001 Lee <i>et al.</i> (2010) | D ₅₀ = 4,26 – 4,7 µm au débit de 10 L.min ⁻¹ dans différentes conditions expérimentales | Sous-estimation de la fraction 1-2,5 µm et légère surestimation de la fraction > 2,5 µm | 3 | Ne convient pas pour les particules de diamètre < 2 µm Pas d'études concernant des vitesses d'air élevées, ni l'influence de l'orientation du dispositif, de l'humidité relative Mise en garde sur le conditionnement des mousses |

4.5.2 Évaluation des dispositifs au regard de la VLEP-8h alvéolaire établie par le CES : Evaluation de la gravimétrie

Limite basse de 0,1 X VLEP-8h :

Le tableau suivant synthétise les concentrations obtenues en fonction des LQ (en µg) retenues pour chaque support (Tableau 14).

La valeur minimale devant être atteinte est 0,1 VLEP-8h soit **0,09 mg.m⁻³** ; les concentrations en vert soulignent que le support est adapté à l'analyse gravimétrique au regard de la VLEP-8h proposée, et pour le débit associé. En effet, différents débits ont été représentés et sont fonction des échantillonneurs évalués au §4.5.1.

Tableau 14 : Concentrations obtenues à partir des LQ des différents supports compatibles avec les dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire

| Support | Caractéristique | LQ (en µg) | Débit (L.min ⁻¹) vol (L) | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1,5 | 1,7 | 2,2 | 2,5 | 2,75 | 4,2 | 4,4 | 10 |
| | | | 720 | 816 | 1056 | 1200 | 1320 | 2016 | 2112 | 4800 |
| PVC | Ø25 | basse 83 | 0,12 | 0,10 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,04 | 0,04 | 0,017 |
| | | élevée 100 | 0,14 | 0,12 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,05 | 0,05 | 0,02 |
| | Ø37 | basse 17 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,004 |
| | | élevée 33 | 0,046 | 0,041 | 0,032 | 0,028 | 0,025 | 0,017 | 0,016 | 0,007 |
| EC | Ø37 | basse 500 | 0,69 | 0,61 | 0,47 | 0,42 | 0,38 | 0,25 | 0,24 | 0,10 |
| | | élevée 1000 | 1,39 | 1,23 | 0,95 | 0,83 | 0,76 | 0,50 | 0,47 | 0,21 |
| Fibres de verre | Ø25 | basse 57 | 0,08 | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,012 |
| | | élevée 400 | 0,56 | 0,49 | 0,38 | 0,33 | 0,30 | 0,20 | 0,19 | 0,08 |
| | Ø37 | basse 30 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,006 |
| | | élevée 1000 | 1,39 | 1,23 | 0,95 | 0,83 | 0,76 | 0,50 | 0,47 | 0,21 |
| Filtre quartz | Ø37 | basse 30 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,006 |
| | | élevée 333 | 0,46 | 0,41 | 0,32 | 0,28 | 0,25 | 0,17 | 0,16 | 0,07 |
| Mousse PU | coupelle CIP 10 | basse 463 | - | - | - | - | - | - | - | 0,10 |
| | | élevée 3330 | - | - | - | - | - | - | - | 0,69 |

Les supports PVC de diamètre 25 mm sont appropriés et permettent d'atteindre quasiment systématiquement 0,1 fois la VLEP-8h pour l'ensemble de la gamme de valeurs de LQ et de débits retenus. La seule exception correspond au cas des débits de 1,5 et 1,7 L.min⁻¹. Toutefois ces LQ sont relativement anciennes et dépendantes des conditions de pesées. Etant très proches du dixième de la VLEP-8h, elles devraient pouvoir être optimisées pour atteindre ce seuil.

Les membranes PVC de diamètre 37 mm ainsi que les filtres en fibres de verre ou de quartz (diamètre 25 ou 37mm) conviennent si la limite basse de la gamme des valeurs de LQ retenues est prise en compte. Les filtres en fibres de quartz ou de verre ne sont pas à privilégier pour une analyse gravimétrique en raison de la « dégradation » (pertes de fibres lors des manipulations).

Concernant les mousses PU, la limite de quantification ne permet pas d'atteindre le dixième de la VLEP-8h.

Les membranes EC ne permettent pas d'atteindre le dixième de la VLEP-8h.

Limite haute de 2 X VLEP-8h :

La valeur maximale devant être atteinte est 2 VLEP-8h soit **1,8 mg.m⁻³**

Le tableau suivant représente les charges portées par le support dans le cas d'un prélèvement de 8 heures ou de deux prélèvements de 4 heures.

En se référant aux valeurs du Tableau 8, les membranes PVC ou EC de diamètre 37 mm, sont capables de prélever jusqu'à **8,7 mg** (valeurs en vert dans le Tableau 15). Dans ce cas, seuls les prélèvements à 1,7 et 2,2 L.min⁻¹ sur 8 heures sont possibles ; tous les débits peuvent être envisagés pour les prélèvements de 4 heures. Pour les membranes de diamètre 25 mm, la charge maximale étant de **4 mg**, seul le débit de 1,7 L.min⁻¹ peut être envisagé pour deux prélèvements successifs de 4 heures.

Pour le prélèvement à 10 L.min⁻¹ (CIP 10), la charge maximale (**65 mg**) n'est pas atteinte quelle que soit la durée du prélèvement.

Tableau 15 : Charge maximale du support (en mg) à 2 VLEP-8h alvéolaire, en fonction du temps de prélèvement et du débit de prélèvement

| Débit (L.min ⁻¹) | Volume pour 8h (L) | Charge pour 8h (en mg) | Charge pour 4 h (en mg) |
|------------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| 1,7 | 816 | 6,5 | 3,3 |
| 2,2 | 1056 | 8,4 | 4,2 |
| 2,5 | 1200 | 9,6 | 4,8 |
| 2,75 | 1320 | 10,6 | 5,3 |
| 4,2 | 2016 | 16,1 | 8,1 |
| 10 | 4800 | 38,4 | 19,2 |

Dans le cas des filtres en fibres de quartz de diamètre 37 mm, le support est capable de prélever jusqu'à **26,1 mg**. Dans ce cas, tous les débits sont possibles quelle que soit la durée de prélèvement. Pour un diamètre 25 mm, la charge maximale est de **11,9 mg** ; les débits allant de 1,7 à 2,75 L.min⁻¹ sur 8 heures sont possibles ; et tous les débits peuvent être envisagés uniquement avec la condition d'effectuer deux prélèvements de 4 heures. Néanmoins, ces supports étant relativement « sensibles » à la dégradation (pertes de fibres lors des manipulations), ces supports ne sont pas à privilégier pour une analyse gravimétrique.

Les membranes PVC de diamètre 25 mm sont les supports de prélèvement les plus appropriés et permettent d'atteindre quasiment systématiquement 0,1 fois la VLEP-8h pour l'ensemble de la gamme de valeurs de LQ et des débits de prélèvement considérés hormis pour les débits inférieurs ou égaux à 1,7 L.min⁻¹. Toutefois étant très proches du dixième de la VLEP-8h, les limites de quantification à ces débits de prélèvement devraient pouvoir être optimisées pour atteindre ce seuil.

Il est à noter néanmoins que ces membranes sont électrostatiques dans certaines conditions et peuvent être aussi sensibles à l'humidité. Il convient donc d'effectuer les corrections appropriées (pesées de blancs). Pour ces membranes, les limites de quantification peuvent être probablement significativement améliorées en se plaçant dans des conditions d'analyse gravimétrique optimales (décrites en § 4.3.1)

Les filtres en fibres de quartz ou de verre ne sont pas à privilégier pour une analyse gravimétrique en raison d'une sensibilité à l'humidité et à la « dégradation » (pertes de fibres lors des manipulations).

En raison du coefficient de rétention des membranes PVC, seuls les dispositifs mettant en œuvre un débit de prélèvement de 1,7 et 2,2 L.min⁻¹ peuvent être utilisés pour effectuer un prélèvement de 8 heures à 2*VLEP-8h, c'est-à-dire les cyclones DO et HD. Pour les autres dispositifs il sera nécessaire d'effectuer 2 prélèvements de 4 heures.

La limite de quantification des mousses PU est supérieure au dixième de la VLEP-8h. Le CIP-10R ne permet donc pas de couvrir la gamme 0,1 à 2*VLEP-8h.

4.6 Évaluation détaillée des méthodes de mesure simultanée de la fraction alvéolaire et inhalable dans l'air des lieux de travail

Le protocole MDHS 14/4 cite plusieurs dispositifs qui permettent de mesurer simultanément plusieurs fractions conventionnelles :

- IOM Dual fraction
- CIS multi-fraction respirable sampler
- Impacteurs Respicon, Mini Moudi et Marple

Tableau 16 : caractéristiques de prélèvement et données fournies dans les protocoles pour les préleveurs de plusieurs fractions

| Dispositif d'échantillonnage | Nature du support | Débit de prélèvement (L.min ⁻¹) | Données fournies dans le protocole | Éléments intéressants à considérer | Référence |
|--|---|---|------------------------------------|---|----------------------------------|
| IOM multidust' dual-fraction respirable | Membrane EC 37mm (8µm) Membrane PVC 37 mm (5µm) Filtres en fibres de verre 37mm | 2 | | Le temps d'échantillonnage ne doit pas excéder 4h – échantillonnage successif (MDHS 14-4) | HSE MDHS 14-4 FD CEN/TR 15230 |
| CIS multi-fraction respirable | Filtres | 3,5 | - | - | HSE MDHS 14-4 |
| Impacteur PPI8 | filtre placé sur l'étage de collection (nitrate de cellulose, fibre de quartz, etc.) | 8 | - | Le temps d'échantillonnage ne doit pas excéder 4h – échantillonnage successif (MDHS 14-4) Un seul étage d'impaction correspondant à la fraction alvéolaire | HSE MDHS 14-4 |
| Impacteur Respicon Impacteur Marple Impacteur Mini-Moudi | Filtres de nature différente | 3,11 2 2 | - | Échantillonneurs multi fractions. Plusieurs étages de collectes. Combinaison de plusieurs étages pour approcher la fraction alvéolaire | HSE MDHS 14-4 |

4.6.1.1 Description et performances du dispositif utilisant un impacteur en cascade

Les impacteurs en cascade fonctionnent sur le principe de l'impaction inertielle, c'est-à-dire la séparation des particules par différence d'inertie qui dépend de la taille et de la vitesse des particules. Le dispositif est constitué d'une succession d'étages dits d'impaction, chacun étant défini

par une ou plusieurs tuyère(s). L'impacteur est relié à une pompe. Pour un débit de fonctionnement donné, le diamètre de la tuyère impose au fluide une vitesse. La rencontre avec un obstacle plan, perpendiculaire au jet d'air, entraîne l'impaction des particules ayant une inertie telle qu'elles échappent au flux d'air qui contourne l'obstacle. Celles n'ayant pas l'inertie suffisante, et donc les plus fines, sont entraînées vers l'étage suivant. Chaque étage est caractérisé par une courbe d'efficacité dont la pente est peu prononcée et le diamètre de coupure est défini par la valeur correspondant à 50 % d'efficacité (D_{50}). Autre critère très important, le débit ne doit strictement pas varier lors de l'échantillonnage si on ne veut pas changer la qualité de la séparation granulométrique.

L'utilisation de l'impacteur en cascade n'est pas préconisée dans les normes de prélèvement de la fraction alvéolaire des poussières à effet non spécifique en milieu professionnel, cependant, le protocole MDHS 14/4 cite le dispositif de type PPI8 parmi les préleveurs à haut débit.

Le fascicule de documentation FD CEN/TR 15230 cite l'échantillonneur « Respicon » comme préleveur possible pour les fractions inhalable, thoracique et alvéolaire.

L'impacteur PPI 8 est un dispositif portatif constitué de 3 étages : une première plaque d'injection, une plaque de sélection en taille et une plaque de collection. Il fonctionne avec une pompe portable dont le débit est égal à $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ pour une efficacité de collecte optimum de la fraction inférieure à $4 \mu\text{m}$. Le prélèvement de la fraction alvéolaire s'effectue sur un filtre placé sur l'étage de collection dont la nature peut varier (nitrate de cellulose, fibre de quartz etc.). La quantité de particules collectées est déterminée par pesée du filtre. La limite de quantification donnée dans le protocole MDHS 14-4 est de $0,4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, le temps d'échantillonnage consécutif ne doit pas excéder 4 heures. En effet, la surcharge du filtre entraîne une mauvaise efficacité de collecte.

L'impacteur Respicon se compose d'un impacteur à deux étages avec trois filtres pour recueillir la fraction inhalable, thoracique et alvéolaire selon la convention ACGIH / ISO / CEN. Le dispositif fonctionne à un débit de $3,11 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Il est composé d'une tête de prélèvement laissant pénétrer les particules de diamètre aérodynamique supérieur à $100 \mu\text{m}$, puis de 2 étages d'impaction permettant la collecte sur filtres de particules de $D_{50} = 4 \mu\text{m}$, $D_{50} = 10 \mu\text{m}$ et d'un filtre « backup ». Des filtres ou membranes de 37 mm peuvent être utilisés pour ce type de dispositif.

Pour l'analyse gravimétrique, la fraction alvéolaire correspond à la masse du 1^{er} filtre, la fraction thoracique est la somme de la masse du premier et du second filtre et la fraction inhalable correspond à la masse combinée des trois filtres.

Seul le dispositif Respicon a fait l'objet d'une étude comparant ses performances par rapport à la courbe conventionnelle alvéolaire et à la courbe conventionnelle inhalable. L'étude comparative menée par Li *et al.*, 2000 met en évidence :

- la détermination de la fraction inhalable, un biais peu important vis-à-vis de la courbe conventionnelle (-11 à +16%) sur l'ensemble de la plage granulométrique testée (2 à $68 \mu\text{m}$) à $0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. A vitesse d'air plus élevée ($1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), le biais est peu important (-16 à +20%) pour des diamètres de particules inférieurs à $40 \mu\text{m}$. Les particules les plus grosses ($68 \mu\text{m}$), sont sur-échantillonnées (biais de +38 à +57%). Une perte sur la tête d'entrée de l'échantillonneur est observée, notamment pour les particules de diamètre supérieur à $40 \mu\text{m}$, et ce d'autant plus que la vitesse d'air est élevée (5 à 8% pour $40 \mu\text{m}$ à $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ contre 1 à 4% à $68 \mu\text{m}$ et $0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ;
- pour la détermination de la fraction alvéolaire, une sous-estimation pour les particules de diamètre $\sim 1,5 \mu\text{m}$. Une perte est observée notamment pour les particules de diamètre compris entre 1 et $10 \mu\text{m}$ dont la plus importante est évaluée pour les particules de diamètre de $5 \mu\text{m}$ (18%) dans 2 conditions de vitesses d'air différentes.

D'autres impacteurs en cascade sont commercialisés et utilisés dans la littérature pour l'analyse de la fraction alvéolaire. Contrairement au PPI8 ou au système Respicon, ces impacteurs inertiels classés dans les préleveurs multi-fractions possèdent des multi étages de collection/impaction dont des diamètres de coupures D_{50} ne correspondent pas aux fractions D_{50} classiques de la fraction

alvéolaire. Ces dispositifs sont utilisés pour l'essentiel pour l'évaluation la qualité de l'air extérieur. La quantité de poussières dans la fraction alvéolaire sera déterminée par la somme de la pesée de tous les filtres correspondant aux étages d'impactions successifs, ce qui nécessite d'avoir une masse suffisante à chaque étage. Les impacteurs répertoriés sont, le Marple, le Mini Moudi, le Dekati et l'impacteur Sioutas. Il est à noter que la pesée de plusieurs filtres pour obtenir la fraction alvéolaire induit des biais et une incertitude plus importante sur la masse totale collectée. La description de ces impacteurs et leur utilisation reportée dans la littérature sont données ci-après à titre indicatif.

L'impacteur en cascade Marple est un impacteur inertiel individuel (Rubow *et al.*, 1987) se composant de 2, 4, 6 ou 8 étages selon les modèles pour la sélection de particules dont les diamètres aérodynamiques varient de 0,4 à 21 μm avec un débit de prélèvement optimum de 2 L.min⁻¹. Pour la configuration en 8 étages, les diamètres de coupure D₅₀ sont : > 21.3 μm , 14.8, 9.8, 6.0, 3.5, 1.55, 0.93, 0.53 et un filtre « back up ». Les particules sont collectées sur un substrat pour chaque étage. Les substrats de collecte préconisés sont les films Mylar, membranes PVC (porosité 5 μm), feuilles aluminium et filtre en fibre de verre de 34 mm de diamètre. La quantité de particules collectées est obtenue par pesée des filtres. L'échantillonneur ne fournit pas de données directes. Les résultats gravimétriques obtenus pour chaque étage permettent de calculer la masse de particules cumulée et ainsi d'obtenir la masse de la fraction alvéolaire. Les données permettent également d'obtenir le diamètre aérodynamique médian en masse (MMAD) et l'écart-type géométrique (GSD). Une description complète des algorithmes utilisés pour le calcul est donnée par Sánchez Jiménez *et al.*, 2010 . Les erreurs associées à l'utilisation de l'impacteur Marple sont liées aux rebond des particules, les pertes sur la surface de l'impacteur (Vincent, 2007) et à l'efficacité d'aspiration de l'entrée de l'impacteur (Wu *et al.*, 2007). Des substrats de collecte graissés permettent d'éviter les pertes dues au rebond des particules.

L'impacteur en cascade Mini Moudi est un impacteur inertiel individuel se composant de 6, 8 ou 10 étages selon les modèles pour une sélection de particules <10 μm pour un débit de fonctionnement de 2 L.min⁻¹. Le modèle à 10 étages nécessitant l'utilisation de pompe à vide non portable ne peut pas être utilisé pour des prélèvements individuels. Pour la configuration en 8 étages pour un débit de fonctionnement de 2 L.min⁻¹, les diamètres de coupure D₅₀ sont : > 10 μm , 5.6, 3.2, 1.8, 1.0, 0.56, 0.32, 0.18 et un filtre « back up ». Les particules sont collectées sur un substrat pour chaque étage. Les substrats de collecte préconisés sont : membranes PVC (porosité 5 μm), feuilles aluminium et filtre en fibre de verre de 37 mm de diamètre. La quantité de particules collectées est obtenue par pesée des filtres.

L'impacteur Dekati, commercialisé pour le prélèvement en air extérieur, a été évalué en environnement de travail (Linnainmaa *et al.*, 2008; Teikari *et al.*, 2003). L'impacteur possède 2 étages d'impaction (10 et 4 μm) pour un débit de pompe de 10 L.min⁻¹. Les échantillons de poussières ont été collectés sur des filtres Teflon® de 47 mm. La pesée du filtre de l'étage 4 μm permet d'évaluer la concentration en poussières alvéolaires. Les résultats de l'étude montrent que ce dispositif surestime les concentrations en poussières alvéolaires. Ceci serait dû au rebond de particules de l'étage d'impaction supérieur. Cet effet est accentué par la surcharge du filtre. L'étude ne préconise pas l'utilisation de ce dispositif pour l'évaluation de la concentration en poussières en air intérieur (environnement de travail). Par ailleurs, il est à noter que ce dispositif n'est pas portatif mais fixe.

L'impacteur en cascade Sioutas est également un impacteur inertiel à 4 étages d'impaction dont les diamètres de coupure sont > 2,5 μm , 1,0 μm , 0,50 μm et 0,25 μm pour un débit de prélèvement de 9 L.min⁻¹. Les filtres utilisés pour la collecte sont les filtres en PTFE de 37 mm.

4.6.1.2 Description et performances du dispositif IOM Dual fraction

L'échantillonneur IOM Dual fraction est un échantillonneur mentionné dans le protocole HSE MDHS 14/4 et dans le guide FD CEN/TR 15230 comme un échantillonneur multi-fractions permettant de prélever simultanément la fraction inhalable et la fraction alvéolaire. Toutefois, aucun protocole recensé ne décrit sa mise en œuvre.

L'IOM Dual-fraction est composé d'une cassette porte filtre réutilisable de 25 mm contenant un filtre et une mousse polyuréthane poreuse. La mousse polyuréthane est conçue pour avoir une porosité spécifique (porosité nominale de 85-90 pores par pouce) permettant de séparer les particules correspondant à la fraction alvéolaire – alors recueillies sur le filtre - des particules les plus grosses retenues dans la mousse (Kenny *et al.*, 2001). L'échantillonneur a une entrée circulaire de 15 mm avec une lèvre en saillie de 1,5 mm vers l'extérieur de manière à minimiser le prélèvement des particules déposées sur les surfaces externes du dispositif. La cassette est un peu plus longue que dans le cas de l'IOM classique de manière à pouvoir intégrer un disque de mousse polyuréthane de 12 mm d'épaisseur de 16,5 mm de diamètre. Il existe deux versions du préleveur IOM Dual fraction, l'une en plastique conducteur et l'autre en acier inoxydable attaché à une pompe d'échantillonnage personnelle fonctionnant à 2 L.min⁻¹.

La détermination de la fraction inhalable s'effectue en pesant la cassette entière (contenant la mousse et le filtre). La détermination de la fraction alvéolaire est réalisée par pesée du filtre uniquement. Il n'est pas nécessaire de manipuler l'insert de mousse pendant la pesée. La cassette est en effet séparée en deux moitiés, la mousse étant pesée dans la partie avant et le filtre dans la partie arrière (Kenny *et al.*, 2001).

Il existe également d'autres versions modifiées de l'IOM permettant de séparer l'aérosol selon les fractions thoracique et alvéolaire selon le même principe d'une séparation avec une mousse polyuréthane (IOM multi-fraction ou tri-fraction).

Les performances de l'IOM Dual fraction pour le prélèvement de la fraction alvéolaire en environnement de travail sont données par Kenny *et al.*, 2001. Le diamètre de coupure moyen D₅₀ varie entre 4,0 et 4,5 µm avec la charge de la mousse polyuréthane : 4,5 µm pour des charges < 10 mg et 4 µm dès 25 mg.

Les auteurs précisent que cet effet de charge est à prendre en considération en cas de prélèvement de particules fines et soulignent également des problèmes de transfert interne des particules sur les deux supports (mousses/filtre) pendant le transport des échantillons (Kenny *et al.*, 2001). Ils n'ont pas étudié les performances de cet échantillonneur pour la fraction inhalable.

Ce dispositif n'a pas fait l'objet d'étude expérimentale comparant ses performances à la courbe conventionnelle alvéolaire ni à la courbe inhalable. Il n'est recommandé ni pour la mesure de la fraction alvéolaire ni pour la mesure de la fraction inhalable.

4.6.1.3 Comparaison de dispositifs

L'étude de Kenny *et al.* (2001) montrent des performances de l'IOM Dual fraction comparables à celle du cyclone HD (2,2 L.min⁻¹). Cependant, des études postérieures concernant la mesure des poussières de silice dans des industries de fabrication de briques (De Vocht *et al.*, 2009) ou dans l'industrie minière (Belle, 2012) montrent des différences entre les prélèvements par IOM dual ou tri-fraction et par cyclone. Dans les deux études, il est montré que l'IOM sous-estime le niveau de poussières alvéolaires. Les auteurs concluent que l'IOM Dual fraction n'est pas satisfaisant en comparaison des cyclones.

Les études de Linnainmaa *et al.*, (2008), Teikari *et al.* (2003) et Skaugset *et al.* 2013 ont comparé plusieurs dispositifs en chambre expérimentale à $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ à partir d'aérosols générés (fine mineral and metals dust) et dans des conditions de terrain dans différentes industries comparant les concentrations obtenues par les différents dispositifs avec celles de l'IOM pour la fraction inhalable et l'IOM Dual fraction pour la fraction alvéolaire :

- concentration mesurée plus faible pour la mesure de la fraction inhalable : cassette fermée 37 mm, Respicon, IOM Dual fraction, Dekati comparativement à l'IOM ;
- concentration mesurée plus élevée pour la mesure de la fraction alvéolaire : Dekati, Respicon comparativement à l'IOM Dual fraction.

L'influence de l'humidité est plus importante pour la combinaison filtre + mousse que le filtre seul avec une différence importante sur la pesée pour la fraction inhalable : augmentation de la charge de 4 à 5 fois en 5 min.

La courbe d'efficacité de la mousse est donnée pour différentes granulométries et varie selon la charge d'aérosol testée : $d_p = 1,1 \mu\text{m}$: 67 à 80% ; $d_p = 2,5$: 59 à 78 %, $d_p = 4 \mu\text{m}$: 48 à 55% ; $d_p = 7 \mu\text{m}$: 3 à 26%. Le diamètre de coupure pour la mousse diminue rapidement à partir de 3-4 mg de poussières.

L'utilisation du dispositif PPI 8 a été comparée avec les cyclones HD et GK (Stacey *et al.*, 2016). Les tests ont été réalisés en tunnel et en air calme. L'étude ne montre pas de différences de performance significatives entre les impacteurs PPI8 et les cyclones en termes de sélections en taille de particules et d'efficacité de collecte.

Rando *et al.*, 2000 ont évalué les performances pour la collecte des poussières de bois par l'impacteur Respicon par comparaison avec les performances du cyclone AI. Les auteurs montrent que, pour le prélèvement de la fraction alvéolaire, une différence de 20 % sur la masse collectée est observée. Ceci pourrait être ajusté par un facteur de correction comme confirmé par Rando *et al.*, 2005.

L'impacteur Respicon a été évalué dans différents environnements de travail de l'industrie du bois par Tatum *et al.*, 2002. Les particules ont été collectées pendant 8 heures à $3,5 \text{ L.min}^{-1}$ sur des filtres PVC (porosité $5 \mu\text{m}$) pour l'analyse gravimétrique. Les concentrations moyennes mesurées pour la fraction alvéolaire varient de 0,03 à $1,16 \text{ mg.m}^{-3}$ avec des coefficients de variation de 8 à 70%. Ces résultats sont en accord avec les résultats des études précédentes montrant le sous-échantillonnage des particules dans la fraction alvéolaire.

Les performances du Sioutas évalué en laboratoire sont données par Singh *et al.*, 2003.

4.6.1.4 Conclusions sur l'efficacité des dispositifs d'échantillonnage simultané des fractions inhalable et alvéolaire

Seul le protocole HSE MDHS 14/4 mentionne plusieurs dispositifs qui permettent de mesurer simultanément plusieurs fractions conventionnelles : IOM Dual fraction, CIS multi-fraction respirable sampler et les impacteurs Respicon, Mini Moudi, Sioutas et Marple.

Aucune étude expérimentale n'a évalué l'efficacité d'échantillonnage de ces dispositifs vis-à-vis des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire. Les dispositifs de prélèvement simultané de la fraction inhalable et alvéolaire ne sont donc pas recommandés tant pour la mesure de la fraction inhalable que pour la mesure de la fraction alvéolaire.

Les données disponibles comparent plusieurs dispositifs entre eux.

L'échantillonneur IOM Dual sampler est sensible à l'empoussièrement, le diamètre de coupure moyen D_{50} variant avec la charge de la mousse polyuréthane en amont du filtre de collecte.

Les impacteurs à multi-étages nécessitant la pesée de plusieurs filtres pour obtenir la fraction alvéolaire présentent des incertitudes importantes liées au cumul des erreurs de pesées.

Le CIS multi-fraction respirable sampler n'a pas pu être évalué car il n'a pas été recensé d'études documentant ses performances.

Tableau 17: Evaluation détaillée des dispositifs de prélèvement simultané de la fraction inhalable et alvéolaire

| Dispositif de prélèvement | Protocoles | Caractéristiques vis-à-vis de la fraction | | Classement | Limites | |
|---------------------------|---|--|-------------------------------------|------------|---|--|
| IOM dual fraction | HSE MDHS 14/4 FD CEN 15230 Linnainmaa <i>et al.</i> (2008) | D ₅₀ 4,0 – 4,5 µm | | 3 | Sous-estimation de la fraction inférieure à 4 µm. | Pas d'études expérimentales sur les performances de ce dispositif vis-à-vis des courbes conventionnelles |
| Impacteur | HSE MDHS 14/4 | PPI8 (8 étages) | - | 3 | Sous-estimation des particules de diamètre compris entre 1 et 10 µm | Un seule étude expérimentale comparant l'impacteur Respicon à la convention alvéolaire et inhalable. Comparaison des autres impacteurs avec des dispositifs cyclone ou IOM dual fraction Les étages de collection ne sont pas spécifiques à la courbe conventionnelle et amènent des erreurs de mesure. |
| | FD CEN 15230 Li <i>et al.</i> , 2000 Skaugset <i>et al.</i> 2013 Linnainmaa <i>et al.</i> (2008) Teikari <i>et al.</i> (2003) | Impacteur Respicon (2 étages) | 1er étage : D ₅₀ ~4,0 µm | | | |
| | Vincent 2007 Wu & Vincent (2007) Linnainmaa <i>et al.</i> (2008) Teikari <i>et al.</i> (2003) | Marple (2 à 8 étages) Mini-Moudi (6 à 10 étages) Dekati SIOUTAS | - | | | |

4.7 Présentation des principales caractéristiques des méthodes applicables pour l'air intérieur

Les fractions conventionnelles utilisées pour la mesure de la concentration en particules dans l'air intérieur sont différentes : il s'agit des fractions PM₁₀ et PM_{2,5}. Elles sont définies comme la masse totale de particules prélevées, déterminée par une méthode de référence ou équivalente à la méthode de référence pour des diamètres aérodynamiques (D_{ae}) inférieurs à 10 et à 2,5 µm respectivement. Par ailleurs, le terme de particules ultrafines (PUF) désigne généralement les particules de diamètre inférieur à 0,1 µm (ou 100 nm), également appelées nanoparticules.

La norme NF EN 12341 Juin 2014 décrit la méthode de référence de détermination des concentrations massiques de PM₁₀ ou PM_{2,5} : il s'agit d'un prélèvement sur filtres suivi d'une pesée à l'aide d'une balance. Ces mesures peuvent être réalisées à l'aide d'un analyseur automatique ou bien d'un préleveur séquentiel sur filtre pour gravimétrie en différé.

5 Conclusions et recommandations du CES

La mesure de la concentration en PSES à des fins de comparaison avec les VLEP-8h inhalable ou alvéolaire consiste à effectuer un prélèvement d'aérosol puis une analyse gravimétrique.

Différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable et de la fraction alvéolaire sont décrits au travers des protocoles recensés. Les performances de ces échantillonneurs en terme d'efficacité de collecte vis-à-vis des conventions inhalable et alvéolaire ont été déterminées dans des études expérimentales de laboratoire. Divers paramètres, notamment la nature des poussières et les conditions environnementales (distribution granulométrique, taux d'empoussièrement, vitesse d'air, orientation du dispositif) influent sur les efficacités d'échantillonnage au regard des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire. Ces dispositifs ont été évalués au regard des critères définis au § 4.2.

Sur la base des normes et protocoles existants, ainsi que des études expérimentales, les différents dispositifs présentent des efficacités d'échantillonnage variables, dépendantes de la granulométrie de l'aérosol et des conditions environnementales notamment la vitesse d'air et de l'orientation du dispositif.

Aucun dispositif ne répond parfaitement aux exigences en terme d'efficacité d'échantillonnage au regard de la fraction conventionnelle inhalable ou alvéolaire dans toutes les situations environnementales et sur l'ensemble de la plage granulométrique d'intérêt.

Dans l'intérêt de la prévention, le GT a fait le choix de favoriser les dispositifs qui surestiment les fractions conventionnelles considérées (et donc de déclasser ceux qui sous-estiment ces mêmes fractions).

VLEP-8h – fraction inhalable :

Concernant les dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable évalués au regard du critère « conformité à la fraction conventionnelle inhalable » :

- **la CFC seule et le PAS-6 sont classés en catégorie 3 et ne sont donc pas recommandés pour le prélèvement de la fraction inhalable.** En effet :
 - o la CFC seule, bien qu'elle soit la plus proche de la fraction conventionnelle pour des aérosols de granulométrie < à 20-30 μm , présente un sous-échantillonnage important à partir de 20-30 μm , quelle que soit la vitesse d'air. Ce sous-échantillonnage est le plus important de tous les dispositifs évalués. Il est noté une diminution de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air les plus faibles et $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$. Cet échantillonneur est également particulièrement sensible à l'orientation, tant dans un plan horizontal que vertical. L'efficacité de collecte de la CFC (seule) n'est donc pas satisfaisante ;
 - o le comportement du PAS-6 vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable à des vitesses d'air inférieures à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ n'a pas été étudié, ni l'influence de l'orientation de ce dispositif vis-à-vis du flux d'air sur l'efficacité de prélèvement ;
 - o le CIP10-I-V1 : ce dispositif a fait l'objet de modification dans sa conception afin d'améliorer ses performances. La version 2 présente une efficacité d'échantillonnage supérieure et un biais vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable moins important.
- **le Button, la CFC + capsule interne, le CIP10-I-v2, le GSP-3.5, l'IOM et le 7-Hole sont classés en catégorie 2 et sont recommandés pour le prélèvement de la fraction inhalable.** En effet :
 - o les biais observés dans les conditions proches de l'air des lieux de travail (vitesse d'air $\leq 0,5 \text{ m.s}^{-1}$) vis-à-vis de la convention sont moindres que ceux observés avec la CFC seule ;

- la sous-estimation de la fraction conventionnelle débute pour des particules de tailles plus grandes (environ 40 à 50 µm pour le GSP-3,5 et la CFC + capsule interne contre 20-30 µm la CFC seule) ;
- le Button semble être plus précis et moins sensible à la vitesse d'air que les autres dispositifs ;
- le Button et l'IOM ont tendance à surestimer la fraction conventionnelle. Le 7-Hole surestime dans des conditions d'orientation face au flux d'air et pour des vitesses d'air faibles.

Concernant l'analyse gravimétrique, celle-ci n'est pas un facteur limitant à condition d'utiliser des membranes PVC et filtre en fibre de quartz pour les dispositifs autres que le CIP10 I-V2 et ce, à condition de respecter également les recommandations en matière de pesée décrites dans le paragraphe 4.3.1. **Les différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable permettent tous de couvrir les domaines de 0,1 à 2*VLEP-8h, avec des prélèvements de 8 heures ou bien 2 prélèvements successifs de 4 heures. Les membranes en PVC sont à privilégier en raison de la potentielle perte de fibres lors des manipulations des filtres en fibres de quartz ou de verre.**

VLEP-8h – fraction alvéolaire :

Concernant les dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire évalués au regard du critère « conformité à la fraction conventionnelle » :

- **les cyclones GS-1 et la coupelle CIP-10-R sont classés en catégorie 3 et ne sont donc pas recommandés pour la mesure de la fraction alvéolaire.** En effet :
 - le dispositif GS-1 n'a pas fait l'objet d'études expérimentales pour évaluer ses performances ;
 - l'utilisation du CIP10-R n'est pas recommandée en raison d'une faible efficacité de collecte des particules de diamètre inférieur à 2 µm.
- **les cyclones Higgins-Dewell (HD) qui se distinguent par des géométries et débits différents, Dorr-Oliver (DO), GK2.69 et 4.162, AI, GS-3 sont classés en catégorie 2 et sont recommandés pour la mesure de la fraction alvéolaire. Des écarts peu importants à la courbe conventionnelle sont observés avec une surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm.** De plus :
 - les méthodes de prélèvement les plus décrites et utilisées mettent en œuvre des cyclones (HD, DO, AI, GS-3). Une optimisation du débit d'échantillonnage a été étudiée pour ces dispositifs pour une meilleure comparaison à la fraction conventionnelle alvéolaire en améliorant les performances et est recommandée dans le cadre de cette expertise (cf. Tableau 19) ;
 - dans le cas d'utilisation de cassettes sensibles aux charges électrostatiques, des dépôts sur les parois sont possibles ;
 - les cyclones Higgins Dewell HD (SIMPEDS, FSP2, Casella plastic, SKC plastic cyclone, BGI4L, FSP10) n'ont pas fait l'objet d'études sur l'orientation du dispositif, ni l'influence de l'humidité relative et ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol contrairement au cyclone DO ;
 - les dispositifs cyclone à haut débit (FSP10, GK2.69 et GK 4.162) peuvent induire une perte de charge plus importante et peuvent être plus contraignants en raison du poids plus important de la pompe de prélèvement.

Concernant l'analyse gravimétrique :

- les supports PVC de diamètre 25 mm sont appropriés et permettent d'atteindre quasiment systématiquement 0,1 fois la VLEP-8h pour l'ensemble de la gamme de valeurs de LQ et de débits retenus. La seule exception correspond aux débits de 1,5 et 1,7 L.min⁻¹, pour lesquels la LQ doit être optimisée ;
- les membranes PVC de diamètre 37 mm ainsi que les filtres en fibres de verre ou de quartz (diamètre 25 ou 37mm) conviennent si la limite basse de la gamme des valeurs de LQ retenues est prise en compte ;
- les filtres en fibres de quartz ou de verre ne sont pas à privilégier pour une analyse gravimétrique en raison d'une sensibilité à l'humidité et à la « dégradation » (pertes de fibres lors des manipulations) ;
- concernant les mousses PU, la limite de quantification ne permet pas d'atteindre le dixième de la VLEP-8h.

Les dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire permettent donc de couvrir les domaines de 0,1 à 2*VLEP-8h, à condition de respecter les recommandations en matière de pesée décrites dans le paragraphe 4.3.1, avec des prélèvements de 8 heures ou bien 2 prélèvements successifs de 4 heures. Seul le CIP10-R ne permet pas de couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h définie pour la fraction alvéolaire.

Concernant les dispositifs d'échantillonnage simultané des fractions inhalable et alvéolaire, aucune étude expérimentale n'a évalué leur efficacité d'échantillonnage vis-à-vis des fractions conventionnelles inhalable et alvéolaire. Ces dispositifs sont donc classés en catégorie 3^(*) ne sont donc pas recommandés tant pour la mesure de la fraction inhalable que pour la mesure de la fraction alvéolaire.

Ainsi, compte tenu des données actuellement disponibles de comparaison des performances d'échantillonnage vis-à-vis des fractions conventionnelles, et de l'évaluation des performances en terme de gravimétrie, le CES recommande pour la mesure de la concentration en PSES aux fins de comparaison avec les VLEP-8h établies par le CES, les dispositifs de prélèvement des fractions inhalable et alvéolaire suivants tout en gardant bien à l'esprit leurs limites spécifiques d'utilisation rappelées dans les tableaux ci-dessous. Ces méthodes de mesures sont classées en catégorie 2, considérées comme indicatives et nécessitant de vérifier leurs performances pour l'environnement dans lequel elles doivent être mises en œuvre.

Tableau 18 : Méthodes recommandées pour la mesure des PSES au regard de la VLEP-8h définie pour la fraction inhalable

| Dispositif de prélèvement | Protocoles / Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2 ^e VLEP-8h |
|---------------------------|---|-----------------|-------------|-----------------|---|--|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| Button | FD CEN/TR 15230 HSE MDHS 14-4, INHST CR 003 A06, INSHT MTA/MA 014/A11 Li et al., 2000 Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000b Aizenberg et al., 2001 Witschger et al. 2004 Görner et al., 2010 Sleeth et al., 2012 | 2 | 1B | 2 | Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles Légère augmentation de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$ Gravimétrie : utilisation de filtre PVC 25 mm - | Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h |
| CFC + capsule interne | NIOSH 0501, INRS MétroPol M-274, INRS MétroPol cassette, NF X43-257 Görner <i>et al.</i> , 2010 | 2 | 1A | 2 | Effet de l'inclinaison non étudié. Sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 μm Biais moins important avec la courbe conventionnelle inhalable aux vitesses d'air faibles. L'efficacité de prélèvement n'a pas été étudiée pour des vitesses d'air $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$. | 8h |
| CIP-10 I V2 | MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 IRSST MA-373 INHST MTA/MA_014_A11 Görner <i>et al.</i> , 2009 Görner et al., 2010 | 2 | 1A | 2 | Sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 μm Diminution de l'efficacité de prélèvement aux vitesses d'air faibles (sous-estimation plus importante) Augmentation de l'efficacité de prélèvement à 1 m.s^{-1} (diminution du biais vis-à-vis de la fraction conventionnelle inhalable) Gravimétrie : le dixième de la VLEP-8h est obtenu avec la limite basse de la LQ. | 8h |

| Dispositif de prélèvement | Protocoles / Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|---------------------------|---|-----------------|-------------|-----------------|--|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| GSP-3.5 / CIS | BIA 7284 DFG MAK sampling and determining aerosols FD CEN/TR 15230 MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 INSHT MTA/MA_014_A11 Kenny et al., 1997 Li et al., 2000 Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000a Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000b Aizenberg et al., 2001 Sleeth et al., 2012 | 2 | 1B | 2 | Sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-dessus de 40 à 50 µm. Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles Aux vitesses d'air ≥ 1 m.s ⁻¹ , augmentation ou diminution de l'efficacité de prélèvement selon l'orientation (face au flux d'air ou moyennée) Dépôt sur les parois pouvant être important pour les diamètres aérodynamiques équivalents les plus élevés. | Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h |
| IOM | MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 IRSST MA-373 INHST MTA/MA_014_A11 Kenny, Aitken, et al., 1997 Kenny et al., 1999 Li et al., 2000 Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000a Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000b Aizenberg et al., 2001 Paik et al., 2004 Görner et al., 2009 Witschger et al., 2004 Görner et al., 2010 Sleeth et al., 2012 | 2 | 1A | 2 | Possible captation de grosses particules émises dans certains procédés via l'ouverture du dispositif Sur-échantillonnage des particules de diamètre supérieur à 70 µm Sur-échantillonnage plus important aux vitesses d'air faibles. Aux vitesses d'air ≥ 1 m.s ⁻¹ , augmentation ou diminution de l'efficacité de prélèvement selon l'orientation (face au flux d'air ou moyennée) | 8h |
| 7-hole | HSE MDHS 14/4 Kenny, Aitken, et al., 1997 Kenny et al., 1999 Li et al., 2000 | 2 | 1A | 2 | Légère sous-estimation de la fraction conventionnelle inhalable au-delà de 30 µm à 0,5 m.s⁻¹ mais surestimation à des vitesses d'air plus faibles. Surestimation dans des conditions d'orientation face au flux d'air | 8h |

(*) conformité du dispositif de prélèvement à la fraction conventionnelle inhalable

Tableau 19 : Méthodes recommandées pour la mesure des PSES au regard de la VLEP-8h définie pour la fraction alvéolaire

| Dispositif de prélèvement | Protocoles/Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|---------------------------|---|-----------------|-------------|-----------------|--|---|
| | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| Cyclone DO | MétoPol Cyclone (2019) INSHT MTA-MA014/A11 OSHA PV 2121 Niosh 0600 NF X 43-259 FD CEN 15230 Lidén & Kenny, 1993 Kar <i>et al.</i> , 1995 Gautam <i>et al.</i> , 1997 Chen <i>et al.</i> , 1999 ; Tsai <i>et al.</i> , 1999 Görner <i>et al.</i> , 2001 | 2 | 2 | 2 | Surestimation pour des particules de tailles de 1 à 4 µm et sous-estimation pour les particules de tailles comprises entre 4 et 10 µm ↓ D ₅₀ et ↑ Biais avec des vitesses d'air élevées et des orientations du dispositif à 90 et 180° Problématique de dépôt sur les parois, d'effet de charges électrostatiques Gravimétrie : optimisation des LQ nécessaires pour atteindre 0,1*VLEP-8h | Nécessité de réaliser 1 prélèvement de 8h |
| Cyclone AI | Niosh 0600 FD CEN 15230 Chen <i>et al.</i> , 1999 Tsai <i>et al.</i> , 1999 Görner <i>et al.</i> , 2001 | 2 | 1A | 2 | Surestimation pour des particules de tailles de 1 à 4 µm et sous-estimation pour les particules de tailles comprises entre 4 et 10 µm Pas d'influence du dépôt sur les parois, ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol | 8h |
| Cyclone GS3 | MétoPol Cyclone (2019) HSE MDHD 14/4 FD CEN 15230 INSHT MTA-MA014/A11 Gautam <i>et al.</i> , 1997 Chen <i>et al.</i> , 1999 | 2 | 1B | 2 | Surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm Pas de différence en fonction de l'orientation du dispositif ↑ Biais à une vitesse d'air très élevée Pas d'effet de dépôt sur les parois ni de charges électrostatiques | nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h. |

| Dispositif de prélèvement | | Protocoles/ Références | Classement | | | Limites | Durée de prélèvement recommandée pour couvrir 0,1 à 2*VLEP-8h |
|--|-----------------|--|-----------------|-------------|-----------------|---|---|
| | | | Prélèvement (*) | Gravimétrie | Méthode globale | | |
| eCyclone HD | FSP 10 | IFA 6068 DFG MAK Lee <i>et al.</i> , 2010 | 2 | 1B | 2 | Perte de charge du fait du haut débit Surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm - Pas d'études concernant des vitesses d'air élevées, ni l'influence de l'orientation du dispositif, de l'humidité relative ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol. Préconisation de pesée filtre + cassette | Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h |
| | SIMPE DS – FSP2 | NIOSH 0600 HSE MDHS 14/4 Görner <i>et al.</i> , 2001 Liden & Kenny 1993 | 2 | | | | |
| | SKC Plastic | SKC Plastic cyclone notice (2019) | 2 | | | | |
| Cyclone GK | GK 2.69 | HSE MDHS 14/4 FD CEN 15230 Kenny & Gussman, 1997 Lee <i>et al.</i> , 2010 | 2 | 1B | 2 | Perte de charge du fait du haut débit Surestimation pour les particules de diamètre inférieur à 4 µm et une sous-estimation pour les particules de diamètre entre 4 et 10 µm Pas d'études concernant des vitesses d'air élevées, ni l'influence de l'orientation du dispositif, de l'humidité relative ni du type, concentration et charge électrostatique de l'aérosol. | Nécessité de réaliser 2 prélèvements de 4h |
| | GK 4.162 | Thorpe, 2011 | 2 | 1B | 2 | | |
| (*) conformité du dispositif de prélèvement à la fraction conventionnelle alvéolaire | | | | | | | |

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 30/01/2020 et par le comité d'experts spécialisé : 26/06/2020.

6 Bibliographie

6.1 Protocoles et méthodes de mesure

Date du recensement des protocoles et méthodes de mesure : septembre 2017

Anses (2016) Méthodologie d'évaluation des méthodes de mesure dans l'air des lieux de travail et l'air intérieur. Rapport du groupe de travail « Métrologie ». Agence nationale de sécurité sanitaire, Maisons-Alfort, France.

Afnor – NF EN 481 : novembre 1993 : Atmosphère des lieux de travail – Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air.

AFNOR – NF ISO 7708 : mai 1996 : Qualité de l'air - Définitions des fractions de taille des particules pour l'échantillonnage lié aux problèmes de santé

AFNOR NF EN 13205-1 : Aout 2014 : Exposition sur les lieux de travail - Évaluation des performances des dispositifs de prélèvement pour le mesurage des concentrations de particules en suspension dans l'air - Partie 1 : exigences générales

AFNOR NF EN 13205-2 : Aout 2014 : Exposition sur les lieux de travail - Évaluation des performances des dispositifs de prélèvement pour le mesurage des concentrations de particules en suspension dans l'air - Partie 2 : essai de performances en laboratoire par détermination par l'efficacité de prélèvement

AFNOR FD CEN/TR 13205-3 : Novembre 2014 : Exposition sur les lieux de travail - Évaluation des performances des dispositifs de prélèvement pour le mesurage des concentrations de particules en suspension dans l'air - Partie 3 : Analyse des données d'efficacité de prélèvement

AFNOR NF EN 13205-4 : Aout 2014 : Exposition sur les lieux de travail - Évaluation des performances des dispositifs de prélèvement pour le mesurage des concentrations de particules en suspension dans l'air - Partie 4 : essai de performances en laboratoire par comparaison des concentrations

AFNOR NF EN 13205-5 : Aout 2014 : Exposition sur les lieux de travail - Évaluation des performances des dispositifs de prélèvement pour le mesurage des concentrations de particules en suspension dans l'air – Partie 5 : essais de performances des échantillonneurs d'aérosols, réalisés sur les lieux de travail

AFNOR NF EN 13205-6 : Aout 2014 : Exposition sur les lieux de travail - Évaluation des performances des dispositifs de prélèvement pour le mesurage des concentrations de particules en suspension dans l'air - Partie 6 : essais de manipulation et de transport

AFNOR FD CEN/TR 15230 : Novembre 2005 : Atmosphères de lieux de travail - Guide pour l'échantillonnage des fractions d'aérosols inhalables, thoraciques et alvéolaires

AFNOR FD CEN/TR 15547 : Mars 2007 : Atmosphères des lieux de travail - Calcul de la concentration en fractions d'aérosols liées à la santé à partir de la concentration mesurée à l'aide d'un dispositif de prélèvement ayant des caractéristiques de performances connues

AFNOR NF X 43-257 : Août 2016 : Qualité de l'air - Air des lieux de travail - Prélèvement d'aérosol à l'aide d'une cassette (orifice 4 mm)

AFNOR NF X43-262 : Mars 2012 : Qualité de l'air - Air des lieux de travail - Prélèvement d'aérosols solides à l'aide d'une coupelle rotative (fractions alvéolaire, thoracique et inhalable)

AFNOR NF X43-259 : 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.

AFNOR NF X 44-013 : Février 1983 : Séparateurs aérauliques - Méthode d'essai des filtres à l'aérosol de chlorure de sodium par photométrie de flamme – Norme Annulée le 12/04/2017.

AFNOR NF ISO 15767 : Août 2009 : Air des lieux de travail - Contrôle et caractérisation de l'incertitude de pesée des aérosols collectés

AFNOR FD CEN/TR 16013-1 : Juillet 2010 : Exposition au poste de travail - Guide d'utilisation des instruments à lecture directe pour la surveillance des aérosols - Partie 1 : choix du moniteur pour des applications spécifiques

AFNOR FD CEN/TR 16013-2 : Juin 2010 : Exposition au poste de travail - Guide d'utilisation des instruments à lecture directe pour la surveillance des aérosols - Partie 2 : évaluation des concentrations de particules en suspension dans l'air à l'aide de compteurs optiques de particules

AFNOR FD CEN/TR 16013-3 : Novembre 2012 : Exposition au poste de travail - Guide d'utilisation des instruments à lecture directe pour la surveillance des aérosols - Partie 3 : évaluation des concentrations de particules en suspension dans l'air à l'aide de photomètres

DFG MAK (2005) - "Sampling and determining aerosols and their chemical components [Air Monitoring Methods, 2005]." In The MAK - Collection for Occupational Health and Safety.

HSE MDHS 14/4: HSE - Methods for the Determination of Hazardous Substances (MDHS) guidance – MDHS 14/4 - General methods for sampling and gravimetric analysis of respirable, thoracic and inhalable aerosols. 13p. – June 2014 (<http://www.hse.gov.uk/pubns/mdhs/pdfs/mdhs14-4.pdf>)

IFA Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen – Kennzahl 7284 : Einatembare Fraktion – Lieferung 31/2003. 2p. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG

IFA Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen – Kennzahl 6068 : Alveolengängige Fraktion – Lieferung 01/2015. 6p. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG

INRS MétroPol M-264/V01.1 : Aérosols en fraction inhalable (CATHIA-I) – septembre 2016 (http://www.inrs.fr/dms/metropol/FicheMetropol/METROPOL_264-1/FicheMetropol-METROPOL_264.pdf).

INRS MétroPol M-274/V01.1 : Aérosols en fraction inhalable (cassette) – septembre 2016 (http://www.inrs.fr/dms/metropol/FicheMetropol/METROPOL_274-1/FicheMetropol-METROPOL_274.pdf)

INRS MétroPol M-277/V01.1 : Aérosols en fraction alvéolaire (CATHIA-A) – septembre 2016 (http://www.inrs.fr/dms/metropol/FicheMetropol/METROPOL_277-1/FicheMetropol-METROPOL_277.pdf)

INRS MétroPol M-278/V01.1 : Aérosols en fraction alvéolaire (cyclone) – septembre 2016 (http://www.inrs.fr/dms/metropol/FicheMetropol/METROPOL_278-1/FicheMetropol-METROPOL_278.pdf)

INRS MétroPol M-279/V01.1 : Aérosols en fraction inhalable (CIP10-I) – septembre 2016 (http://www.inrs.fr/dms/metropol/FicheMetropol/METROPOL_279-1/FicheMetropol-METROPOL_279.pdf)

INRS MétroPol M-281/V01.1 : Aérosols en fraction alvéolaire (CIP10-A) – septembre 2016 (http://www.inrs.fr/dms/metropol/FicheMetropol/METROPOL_281-1/FicheMetropol-METROPOL_281.pdf)

INRS MétroPol CIP 10 : Prélèvement des aérosols par le dispositif CIP 10 – version 2 juin 2017. 15p. (<http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cip10/metropol-prelevement-cip10.pdf>)

INRS MétroPol cyclone : Prélèvement des aérosols par cyclone – version 1 octobre 2015. 9p. (<http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cyclone/metropol-prelevement-cyclone.pdf>)

INRS MétroPol cassette : Prélèvement des aérosols par cassette fermée – version 1 octobre 2015. 15p. (<http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cassette/metropol-prelevement-cassette.pdf>)

INRS MétroPol CATHIA: Prélèvement des aérosols par le dispositif CATHIA – version 1 octobre 2015. 15p. (<http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cathia/metropol-prelevement-cathia.pdf>)

INSHT CR-03/2006 : Toma de muestras de aerosoles. Muestreadores de la fracción inhalable de materia particulada. 33p.

(http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/MetodosAnalisis/Ficheros/CR/CR_003_A06.pdf)

INSHT MTA/MA-014/A11 : 2011 : Determinación de materia particulada (fracciones inhalable, torácica y respirable) en aire - Método gravimétrico. 20p. (http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/MetodosAnalisis/Ficheros/MA/MA_014_A11.pdf)

IRSST MA-373 : 2015 : Détermination des poussières de fraction inhalable dans l'air. 14p. (<http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PublIRSST/MA-373.pdf>)

NIOSH 0500 : NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Fourth Edition, Method 500, issue 2, dated 15 August 1994 : Particulate not otherwise regulated, total – 3p. (<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/0500.pdf>)

NIOSH 0501 : NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Fifth Edition, Method 501, issue 1, dated 8 May 2015 : Particulate not otherwise regulated, total – 4p. (<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/0501.pdf>)

NIOSH 0600 : NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Fourth Edition, Method 0600, issue 3, dated 15 January 1998 : Particulate not otherwise regulated, respirable – 6p. (<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/0600.pdf>)

AFNOR NF EN 482 +A1 Novembre 2015 : Exposition sur les lieux de travail - Exigences générales concernant les performances des procédures de mesure des agents chimiques

OSHA 15 - OSHA Sampling and analytical methods – Gravimetric Determination - Method PV2121:March 2003 (<https://www.osha.gov/dts/sltc/methods/partial/pv2121/pv2121.html>)

6.2 Publications

- Aitken, R. J., P. E. J. Baldwin, G. C. Beaumont, L. C. Kenny, and A. D. Maynard. 1999. "Aerosol inhalability in low air movement environments." *Journal of Aerosol Science* 30 (5):613-626. doi: 10.1016/S0021-8502(98)00762-9.
- Aizenberg, V., K. Choe, S. A. Grinshpun, K. Willeke, and P. A. Baron. 2001. "Evaluation of personal aerosol samplers challenged with large particles." *Journal of Aerosol Science* 32 (6):779-793. doi: 10.1016/S0021-8502(00)00119-1.
- Aizenberg, V., E. England, S. Grinshpun, K. Willeke, and G. Carlton. 2000. "Metal exposure among abrasive blasting workers at four U.S. air force facilities." *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 15 (10):766-772. doi: 10.1080/10473220050129400.
- Aizenberg, V., S. A. Grinshpun, K. Willeke, J. Smith, and P. A. Baron. 2000a. "MEASUREMENT OF THE SAMPLING EFFICIENCY OF PERSONAL INHALABLE AEROSOL SAMPLERS USING A SIMPLIFIED PROTOCOL." *Journal of Aerosol Science* 31 (2):169-179. doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(99\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(99)00037-3).
- Aizenberg, V., S. A. Grinshpun, K. Willeke, J. Smith, and P. A. Baron. 2000b. "Performance characteristics of the button personal inhalable aerosol sampler." *American Industrial Hygiene Association Journal* 61 (3):398-404.
- Amran, S., M. T. Latif, M. F. Khan, A. M. Leman, E. Goh, and S. A. Jaafar. 2016. "Silica dust exposure: Effect of filter size to compliance determination." 2016 Postgraduate Colloquium of the Universiti Kebangsaan Malaysia, Faculty of Science and Technology, UKM FST 2016.
- Baldwin, P. E., and A. D. Maynard. 1998. "A survey of wind speeds in indoor workplaces." *Ann Occup Hyg* 42 (5):303-13. doi: 10.1016/s0003-4878(98)00031-3.

- Bartley, D. L. 1998. "Inhalable aerosol samplers." *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 13 (5):274-278. doi: 10.1080/1047322X.1998.10390082.
- Bartley, David L., Chih-Chieh Chen, Ruiguang Song, and Thomas J. Fischbach. 1994. "Respirable Aerosol Sampler Performance Testing." *American Industrial Hygiene Association Journal* 55 (11):1036-1046. doi: 10.1080/15428119491018303.
- Belle, B. . 2012. "Experiences of the institute of occupational medicine foam respirable sampler use in mines." 12th Coal Operators' Conference, University of Wollongong - Australia, 16-17/02/2012.
- Brixey, L. A., and J. H. Vincent. 2005. "Aspiration efficiency of IOM-like personal aerosol samplers from experiments with a new rapid data acquisition system." *Aerosol Science and Technology* 39 (12):1164-1173. doi: 10.1080/02786820500428625.
- Buchan, R. M., S. C. Soderholm, and M. I. Tillery. 1986. "Aerosol sampling efficiency of 37 mm filter cassettes." *Am Ind Hyg Assoc J* 47 (12):825-31. doi: 10.1080/15298668691390728.
- Calzavara, T. S., C. M. Carter, and C. Axten. 2003. "Air sampling methodology for asphalt fume in asphalt production and asphalt roofing manufacturing facilities: total particulate sampler versus inhalable particulate sampler." *Appl Occup Environ Hyg* 18 (5):358-67. doi: 10.1080/10473220301366.
- Carlton, G. N. 2003. "The impact of a change to inhalable occupational exposure limits: Strontium chromate exposure in the u.s. air force." *American Industrial Hygiene Association Journal* 64 (3):306-311. doi: 10.1080/15428110308984821.
- Champmartin, C., and F. Clerc. 2014. "Inhalable dust measurements as a first approach to assessing occupational exposure in the pharmaceutical industry." *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 11 (2):85-92. doi: 10.1080/15459624.2013.843781.
- Chen, C. C., and S. H. Huang. 1999. "Shift of aerosol penetration in respirable cyclone samplers." *American Industrial Hygiene Association Journal* 60 (6):720-729. doi: 10.1080/00028899908984494.
- Courbon, P., R. Wrobel, and J. F. Fabries. 1988. "A new individual respirable dust sampler: The cip 10." *Annals of Occupational Hygiene* 32 (1):129-143. doi: 10.1093/annhyg/32.1.129.
- De Vocht, F., A. Hirst, and A. Gardner. 2009. "Application of PUF foam inserts for respirable dust measurements in the brick-manufacturing industry." *Ann Occup Hyg* 53 (1):19-25. doi: 10.1093/annhyg/men068.
- de Vocht, F., D. Huizer, M. Prause, K. Jakobsson, B. Peplonska, K. Straif, and H. Kromhout. 2006. "Field comparison of inhalable aerosol samplers applied in the european rubber manufacturing industry." *International Archives of Occupational and Environmental Health* 79 (8):621-629. doi: 10.1007/s00420-006-0087-6.
- Demange, Martine, Peter Görner, Jean-Marie Elcabache, and Richard Wrobel. 2002. "Field Comparison of 37-mm Closed-Face Cassettes and IOM Samplers." *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 17 (3):200-208. doi: 10.1080/104732202753438289.
- Deygout, F., and P. Le Coutaller. 2010. "Field sampling investigations within the road paving industry." *J Occup Environ Hyg* 7 (2):103-8. doi: 10.1080/15459620903435674.
- Gautam, Mridul, and Avula Sreenath. 1997. "Performance of a respirable multi-inlet cyclone sampler." *Journal of Aerosol Science* 28 (7):1265-1281. doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(96\)00472-7](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(96)00472-7).
- Görner, P., X. Simon, D. Bémer, and G. Lidén. 2012. "Workplace aerosol mass concentration measurement using optical particle counters." *Journal of Environmental Monitoring* 14 (2):420-428. doi: 10.1039/c1em10558b.
- Görner, P., X. Simon, R. Wrobel, E. Kauffer, and O. Witschger. 2010. "Laboratory study of selected personal inhalable aerosol samplers." *Annals of Occupational Hygiene* 54 (2):165-187. doi: 10.1093/annhyg/mep079.

- Görner, P., R. Wrobel, V. Mička, V. Škoda, J. Denis, and J. F. Fabriès. 2001. "Study of fifteen respirable aerosol samplers used in occupational hygiene." *Annals of Occupational Hygiene* 45 (1):43-54. doi: 10.1016/S0003-4878(00)00014-4.
- Görner, P., R. Wrobel, and X. Simon. 2009. "High efficiency CIP 10-I personal inhalable aerosol sampler." *Journal of Physics: Conference Series* 151. doi: 10.1088/1742-6596/151/1/012061.
- Harper, M., and B. S. Muller. 2002. "An evaluation of total and inhalable samplers for the collection of wood dust in three wood products industries." *Journal of Environmental Monitoring* 4 (5):648-656. doi: 10.1039/b202857n.
- Harper, M., B. S. Muller, and A. Bartolucci. 2002. "Determining particle size distributions in the inhalable size range for wood dust collected by air samplers." *Journal of Environmental Monitoring* 4 (5):642-647. doi: 10.1039/b202856p.
- Kalatoor, S., S. A. Grinshpun, K. Willeke, and P. Baron. 1995. "New aerosol sampler with low wind sensitivity and good filter collection uniformity." *Atmospheric Environment* 29 (10):1105-1112. doi: 10.1016/1352-2310(95)00044-Y.
- Kar, K., and M. Gautam. 1995. "Orientation Bias of the Isolated 10-mm Nylon Cyclone at Low Stream Velocity." *American Industrial Hygiene Association Journal* 56 (11):1090-1098. doi: 10.1080/15428119591016304.
- Kauffer, E., R. Wrobel, P. Görner, C. Rott, M. Grzebyk, X. Simon, and O. Witschger. 2010. "Site comparison of selected aerosol samplers in the wood industry." *Annals of Occupational Hygiene* 54 (2):188-203. doi: 10.1093/annhyg/mep078.
- Kenny, L. C., R. Aitken, C. Chalmers, J. F. Fabriès, E. Gonzalez-Fernandez, H. Kromhout, G. Lidén, D. Mark, G. Riediger, and V. Prodi. 1997. "A collaborative european study of personal inhalable aerosol sampler performance." *Annals of Occupational Hygiene* 41 (2):135-153. doi: 10.1016/S0003-4878(96)00034-8.
- Kenny, L. C., R. J. Aitken, P. E. J. Baldwin, G. C. Beaumont, and A. D. Maynard. 1999. "THE SAMPLING EFFICIENCY OF PERSONAL INHALABLE AEROSOL SAMPLERS IN LOW AIR MOVEMENT ENVIRONMENTS." *Journal of Aerosol Science* 30 (5):627-638. doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(98\)00752-6](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00752-6).
- Kenny, L. C., and R. A. Gussman. 1997. "Characterization and modelling of a family of cyclone aerosol pre-separators." *Journal of Aerosol Science* 28 (4):677-688. doi: 10.1016/S0021-8502(96)00455-7.
- Kenny, L. C., and G. Lidén. 1991. "A technique for assessing size-selective dust samplers using the APS and polydisperse test aerosols." *Journal of Aerosol Science* 22 (1):91-100. doi: 10.1016/0021-8502(91)90095-Y.
- Kenny, L., K. Chung, M. Dilworth, C. Hammond, J. Wynn Jones, Z. Shreeve, and J. Winton. 2001. "Applications of low-cost, dual-fraction dust samplers." *Annals of Occupational Hygiene* 45 (1):35-42. doi: 10.1016/S0003-4878(00)00008-9.
- Kerr, S. M., H. J. Muranko, and J. H. Vincent. 2002. "Personal sampling for inhalable aerosol exposures of carbon black manufacturing industry workers." *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 17 (10):681-692. doi: 10.1080/10473220290096177.
- Lee, T., S. W. Kim, W. P. Chisholm, J. Slaven, and M. Harper. 2010. "Performance of high flow rate samplers for respirable particle collection." *Annals of Occupational Hygiene* 54 (6):697-709. doi: 10.1093/annhyg/meq050.
- Lee, T., A. Thorpe, E. Cauda, and M. Harper. 2016. "Calibration of high flow rate thoracic-size selective samplers." *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 13 (6):D93-D98. doi: 10.1080/15459624.2016.1153804.
- Li, S. N., and D. A. Lundgren. 1999. "Weighing accuracy of samples collected by IOM and CIS inhalable samplers." *American Industrial Hygiene Association Journal* 60 (2):235-236. doi: 10.1080/00028899908984441.

- Li, S. N., and D. A. Lundgren. 2002. "Aerosol aspiration efficiency of blunt and thin-walled samplers at different wind orientations." *Aerosol Science and Technology* 36 (3):342-350. doi: 10.1080/027868202753504533.
- Li, S. N., D. A. Lundgren, and D. Rovell-Rixx. 2000. "Evaluation of six inhalable aerosol samplers." *American Industrial Hygiene Association Journal* 61 (4):506-516.
- Lidén, G., and L. C. Kenny. 1993. "Optimization of the performance of existing respirable dust samplers." *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 8 (4):386-391.
- Linnainmaa, M., J. Laitinen, A. Leskinen, O. Sippula, and P. Kalliokoski. 2008. "Laboratory and field testing of sampling methods for inhalable and respirable dust." *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 5 (1):28-35. doi: 10.1080/15459620701763723.
- O'Connor, S., P. F. O'Connor, H. A. Feng, and K. Ashley. 2014. "Gravimetric analysis of particulate matter using air samplers housing internal filtration capsules." *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 74 (10):403-410.
- Paik, S. Y., and J. H. Vincent. 2004. "The Orientation-averaged Aspiration Efficiency of IOM-like Personal Aerosol Samplers Mounted on Bluff Bodies." *Annals of Occupational Hygiene* 48 (1):3-11. doi: 10.1093/annhyg/meg088.
- Rando, R., H. Poovey, D. Mokadam, J. Brisolaro, and H. Glindmeyer. 2005. "Field performance of the RespiCon™ for size-selective sampling of industrial wood processing dust." *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2 (4):219-226. doi: 10.1080/15459620590930309.
- Rando, R., H. Poovey, D. Mokadam, and H. Glindmeyer. 2000. "Performance of the RESPICON for sizeselective sampling of wood dust. ." American Industrial Hygiene Conference & Exposition,, Orlando, FL, May 20–25, 2000.
- Rubow, K. L., V. A. Marple, J. Olin, and M. A. McCawley. 1987. "A personal cascade impactor: design, evaluation and calibration." *Am Ind Hyg Assoc J* 48 (6):532-8. doi: 10.1080/15298668791385174.
- Sánchez Jiménez, A., K.S. Galea, and R.J. Aitken, eds. 2010 *Guidance for collection of relevant particle size distribution data of workplace aerosols-Cascade Impactor Measurements. IOM Research Report TM/09/04*. Edinburgh, UK.: IOM.
- Singh, M., C. Misra, and C. Sioutas. 2003. "Field evaluation of a personal cascade impactor sampler (PCIS)." *Atmospheric Environment* 37 (34):4781-4793. doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.08.013.
- Skaugset, N. P., D. G. Ellingsen, H. Notø, L. Jordbekken, and Y. Thomassen. 2013. "Intersampler field comparison of respicon®, IOM, and closed-face 25-mm personal aerosol samplers during primary production of aluminium." *Annals of Occupational Hygiene* 57 (8):1054-1064. doi: 10.1093/annhyg/met025.
- SKC. 2018. SKC Plastic Cyclone Notice - Models 225-69 with 25mm cassette and 225-69-37 with 37mm cassette (http://weber.hu/Downloads/SKC/SKC_PlasticCyclone225_69.pdf, accédé le 20/11/2019).
- Sleeth, D. K., and J. H. Vincent. 2011. "Proposed modification to the inhalable aerosol convention applicable to realistic workplace wind speeds." *Annals of Occupational Hygiene* 55 (5):476-484. doi: 10.1093/annhyg/meq100.
- Sleeth, D. K., and J. H. Vincent. 2012. "Performance study of personal inhalable aerosol samplers at ultra-low wind speeds." *Annals of Occupational Hygiene* 56 (2):207-220. doi: 10.1093/annhyg/mer089.
- Stacey, P., A. Thorpe, and A. Echt. 2016. "Performance of High Flow Rate Personal Respirable Samplers When Challenged with Mineral Aerosols of Different Particle Size Distributions." *Annals of Occupational Hygiene* 60 (4):479-492. doi: 10.1093/annhyg/mev097.
- Tatum, V. L., A. E. Ray, and D. C. Rovell-Rixx. 2001. "The Performance of Personal Inhalable Dust Samplers in Wood-Products Industry Facilities." *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 16 (7):763-769. doi: 10.1080/10473220121612.

- Tatum, V., A. E. Ray, and D. Rovell-Rixx. 2002. "Performance of the RespiCon™ personal aerosol sampler in forest products industry workplaces." *American Industrial Hygiene Association Journal* 63 (3):311-316.
- Teikari, M., M. Linnainmaa, J. Laitinen, P. Kalliokoski, J. Vincent, P. Tiitta, and T. Raunemaa. 2003. "Laboratory and field testing of particle size-selective sampling methods for mineral dusts." *American Industrial Hygiene Association Journal* 64 (3):312-318. doi: 10.1080/15428110308984822.
- Thorpe, A. 2007. "Assessment of personal direct-reading dust monitors for the measurement of airborne inhalable dust." *Annals of Occupational Hygiene* 51 (1):97-112. doi: 10.1093/annhyg/mel032.
- Tsai, C. J., H. G. Shiau, K. C. Lin, and T. S. Shih. 1999. "Effect of deposited particles and particle charge on the penetration of small sampling cyclones." *Journal of Aerosol Science* 30 (3):313-323. doi: 10.1016/S0021-8502(98)00054-8.
- Tsai, P. J., J. H. Vincent, G. Wahl, and G. Maldonado. 1995. "Occupational exposure to inhalable and total aerosol in the primary nickel production industry." *Occupational and Environmental Medicine* 52 (12):793-799. doi: 10.1136/oem.52.12.793.
- Verpaele, S., and J. Jouret. 2013. "A comparison of the performance of samplers for respirable dust in workplaces and laboratory analysis for respirable quartz." *Annals of Occupational Hygiene* 57 (1):54-62. doi: 10.1093/annhyg/mes038.
- Vincent, J. H. 2012. "Occupational and environmental aerosol exposure assessment: a scientific journey from the past, through the present and into the future." *J Environ Monit* 14 (2):340-7. doi: 10.1039/c1em10586h.
- Vincent, J.H. 2007. *Aerosol Sampling: Science, Standards, Instrumentation and Applications*. West Sussex: John Willey.
- Werner, M. A., T. M. Spear, and J. H. Vincent. 1996. "Investigation into the impact of introducing workplace aerosol standards based on the inhalable fraction." *Analyst* 121 (9):1207-14.
- Witschger, O., S. A. Grinshpun, S. Fauvel, and G. Basso. 2004. "Performance of personal inhalable aerosol samplers in very slowly moving air when facing the aerosol source." *Annals of Occupational Hygiene* 48 (4):351-368. doi: 10.1093/annhyg/meh006.
- Woehkenberg, Mary Lynn, and David L. Bartley. 1998. "Inhalable Aerosol Samplers." *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 13 (5):274-278. doi: 10.1080/1047322X.1998.10390082.
- Wu, Y. H., and J. H. Vincent. 2007. "A modified marple-type cascade impactor for assessing aerosol particle size distributions in workplaces." *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 4 (10):798-807. doi: 10.1080/15459620701591140.

ANNEXES

Annexe 1: Support technique : présentation détaillée des dispositifs de prélèvement individuel de la fraction inhalable et alvéolaire dans l'air des lieux de travail

Données disponibles sur les échantillonneurs de la fraction inhalable issues des protocoles

| Dispositif d'échantillonnage | Nature du support | Débit de prélèvement (L.min ⁻¹) | Données fournies dans le protocole | Éléments intéressants à considérer | Référence |
|------------------------------|--|---|---|--|---|
| CIP 10-I V.2 | Mousse polyuréthane | 10 | LD : 139 à 155 µg LQ = 463 à 517 µg Charge maximale = 65 mg Incertitudes élargies sur la pesée = 20% | Efficacité de prélèvement faible pour les particules très fines de type fumée de soudage. Prise en compte des particules déposées dans la mousse et la capsule | INRS MétroPol CIP 10 INRS MétroPol M 279 |
| | | | - | | FD CEN/TR 15230 INHST CR-03/2006 INSHT MTA/MA_014_A11 |
| IOM | Filtre diamètre 25 mm + porte filtre L'échantillonneur et le porte-filtre peuvent être en plastique conducteur ou en acier inoxydable. Filtres en fibres de verre, membrane en ester de cellulose (MCE), PVC, polycarbonate ou gélatine. | 2 | IOM en inox + filtre PVC 25 mm (5 µm) : LQ = 40µg Domaine d'application : 0,040 à 40 mg (soit 0,1 à 100 mg.m ⁻³ pour 400 L à 2 L.min ⁻¹) incertitude analytique = 0,72% fidélité = 0,7% | Comparaison avec d'autres préleveurs, dans différentes conditions d'utilisation Possibilité de projection directe des grosses particules à l'intérieur (sans avoir été aspirées, ouverture 15 mm). Il est recommandé d'utiliser des cassettes filtrantes métalliques car elles sont beaucoup plus stables en poids Prise en compte des particules déposées dans le filtre et dans le porte-filtre | IRSST MA-373 |
| | | | IOM plastique + Filtre fibre de verre 25mm (1µm) : - LD = 28 µg - LQ = 92 µg - Incertitude élargie sur la pesée : 18 µg IOM inox + Filtre fibre de verre 25mm (1µm) : - LD = 19 µg - LQ = 64 µg - Incertitude élargie sur la pesée : 13 µg | | INHST MTA/MA_014_A11 |
| | | | - | | HSE MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 |
| CIS GSP-3,5 | Filtre en fibres de verre 37 mm | 3,5 | LQ = 300 µg (BIA 7284, DFG MAK,) | - | BIA 7284 DFG MAK sampling and determining aerosols |
| | | | LQ = 78 µg Incertitude analytique élargie : 16% | | INSHT MTA/MA_014_A11 |

| Dispositif d'échantillonnage | Nature du support | Débit de prélèvement (L.min ⁻¹) | Données fournies dans le protocole | Éléments intéressants à considérer | Référence |
|------------------------------|--|---|--|--|---|
| | | | - | | FD CEN/TR 15230 HSE MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 |
| GSP-10 | Filtre en fibres de verre 37 mm | 10 | LD = 300 µg | - | BIA 7284 DFG MAK sampling and determining aerosols |
| | | | LQ = 78 µg incertitude analytique élargie : 16% | | INSHT MTA/MA-014-A11 |
| | | | - | | FD CEN/TR 15230 |
| CFC 37 mm | Membrane PVC 37 mm Filtres en fibres de verre ou fibres de quartz, membrane en ester de cellulose (MCE), téflon Possibilité cassette 25 mm | 1 à 2 | Membrane PVC : LD = 14 à 20 µg Rétention = 1 mg.cm ⁻² | Dépôt sur les parois de la cassette (prise en compte uniquement de la fraction collectée) Efficacité de prélèvement à 50% à partir de 20 µm Masse maximale prélevée : 2 mg. Étanchéité à contrôler Maintenir l'axe de captage horizontal et vers l'avant Mesure pondérales de poussières totales (IRSST 48-1, NIOSH 500, INSHT CR_003/A06) Pour évaluation de la fraction inhalable : adapté à l'échantillonnage des aérosols jusqu'à 20 µm de diamètre (NF X 43-257). Peu sensible aux projections directes des particules | INRS MétroPol M-274 INRS MétroPol cassette NF X43-257 |
| | | | Filtre en fibres de verre ou de quartz : LD = 9 à 63 µg Incertitude analytique élargie : 20% Rétention = 3 mg.cm ⁻² | | |
| | | | Membrane polycarbonate : Rétention = 0,5 mg.cm ⁻² | | |
| | | | Membrane acétate ou mélange esters de cellulose : rétention = 1 mg.cm ⁻² | | |
| | | | Filtre PVC 37mm (5µm) LD = 30 µg LQ = 100 µg Charge maximale = 2 mg Domaine d'application : 1 à 20 mg.m ⁻³ pour 100 L d'air prélevé Domaine de validation = 8 à 28 mg.m ⁻³ Biais = 0,01% Fidélité globale (overall precision) = 0,056 Exactitude (accuracy) = ± 11,04% | | NIOSH 0500 |
| | | | Filtre PVC 37 mm (idem 25 mm) LQ = 25 µg Incertitude analytique = 4% | | IRSST 48-1 |
| | | | - | | INHST CR_003_A06 |

| Dispositif d'échantillonnage | Nature du support | Débit de prélèvement (L.min ⁻¹) | Données fournies dans le protocole | Éléments intéressants à considérer | Référence |
|------------------------------|---|---|---|--|--|
| CFC 37 mm et capsule interne | Membrane PVC 37mm (2 à 5 µm), soudée à une capsule en PVC | 1 à 2 | Filter PVC 37 mm (5µm): LD = 75 µg LQ = 250 µg Domaine de travail = 2,5 à 50 mg.m ⁻³ pour 100 L d'air Domaine de validation : 0,1 à 4 mg par échantillon Biais = 0,058 Fidélité globale (Overall precision) = 0,059 Exactitude (Accuracy) = ±15,5% Rétention maximale de 5 mg. | Masse maximale prélevée : 5 mg Évite le dépôt des particules fines sur les parois de la cassette (prise en compte de la fraction captée) Maintenir l'axe de captage horizontal et vers l'avant | NIOSH_0501 |
| | | | Capsule soudée à une membrane en esters de cellulose : LD = 45 à 113 µg Rétention >> 1 mg.cm ⁻² . | | INRS MétroPol M-274 INRS MétroPol cassette NF X43-257 |
| Flying Saucer 37mm | Membrane PVC 37 mm | 2 | LQ = 66 µg | Dispositif indiqué pour la fraction non-alvéolaire (inhalable ?) Pesée automatique de la cassette, dispositif propre à l'OSHA | OSHA PV 2121 |
| Button | - | - | - | - | HSE MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 INSHT MTA/MA-014/A11 |
| 7-Hole (ou multi-orifice) | - | - | - | - | HSE MDHS 14-4 INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 |
| PAS 6 | - | - | - | - | INHST CR-03/2006 FD CEN/TR 15230 |

Données disponibles sur les échantillonneurs de la fraction alvéolaire issues des protocoles

| Dispositif d'échantillonnage | Nature du support | Débit de prélèvement (L.min ⁻¹) | Données fournies dans le protocole | Éléments intéressants à considérer | Référence |
|------------------------------|--|---|--|---|--|
| Cyclone DO | Membrane PVC 37 mm (5µm) Filtres en fibres de verre 37mm Fibres de quartz | 1,7 | Membrane PVC : LQ = 17 µg, incertitude analytique élargie : 3% (INSHT) LD = 14-20 µg (Métropol M278) Rétention = 1 mg.cm ⁻² LD = 30 µg (NIOSH 06000) LQ = 66 µg (OSHA PV2121) Filtre en fibre de verre ou de quartz : LQ = 78 µg, incertitude analytique élargie : 16% (INSHT) Filtre en fibre de quartz : LD = 9-63 µg Incertitude analytique élargie : 20% Rétention = 3 mg.cm ⁻² (Métropol M278) | Efficacité de prélèvement proche de la fraction alvéolaire Influence du colmatage, du débit et de l'orientation du préleveur Masse maximale prélevée : 2 mg (NIOSH) | MétroPol 278 / INSHT MTA-MA 014-A11 / OSHA PV2121 / NIOSH 0600 / FD CEN/TR 15230 |
| Cyclone Higgins Dewell | Membrane EC 37mm (8µm) Membrane PVC 37 mm (5µm) Filtres en fibres de verre 37mm ou 25 mm | 2,2 | Membrane en esters de cellulose : LD =150-300 µg (DFG MAK) Filtre en fibre de verre : 100 µg (DFG MAK) | Masse maximale prélevée : 2 mg (NIOSH) Le temps d'échantillonnage ne doit pas excéder 4h – échantillonnage successif (MDHS 14-4) | DFG MAK /NIOSH 0600 /HSE MDHS 14-4 / FD CEN/TR 15230 INSHT MTA-MA 014-A11 / |
| Cyclone GS1/GS-3 | Membrane EC 37mm (8µm) Membrane PVC 37 mm (5µm) Filtres en fibres de verre 37mm ou 25 mm | 2,75 | - | Le temps d'échantillonnage ne doit pas excéder 4h – échantillonnage successif (MDHS 14-4) | HSE MDHS 14-4 FD CEN/TR 15230 INSHT MTA-MA 014-A11 / |

| Dispositif d'échantillonnage | Nature du support | Débit de prélèvement (L.min ⁻¹) | Données fournies dans le protocole | Éléments intéressants à considérer | Référence |
|------------------------------|---|---|---|--|--|
| Cyclone GK2.69 | Membrane EC 37mm (8µm) Membrane PVC 37 mm (5µm) Filtres en fibres de verre 37mm | 4,2 | - | Le temps d'échantillonnage ne doit pas excéder 4h – échantillonnage successif (MDHS 14-4) | HSE MDHS 14-4 FD CEN/TR 15230 |
| Cyclone AI | Membrane PVC 37 mm (5µm) Filtre en fibres de verre 25 mm | 2,5 | Temps d'échantillonnage Filtre PVC : LD = 30 µg (NIOSH) | Masse maximale prélevée : 2 mg | NIOSH 0600 FD CEN/TR 15230 INSHT MTA-MA 014-A11 / |
| CIP 10-R | Mousse polyuréthane | 10 | LQ = 463 – 603 µg (Métropol M281) LD = 1 mg (DFG MAK) | Le dispositif ne s'applique pas aux particules < 2µm Condition de préparation des coupelles | Métropol 281 + Fiche MétroPol CIP 10 FD CEN/TR 15230 DFG MAK |

Tableau récapitulatif des limites de quantification des supports de prélèvement (en µg) (ordre de grandeur)

| SUPPORTS | CARACTERISTIQUES | PROTOCOLES / ARTICLES | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------------------|--|-------------------------------|----------------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------|------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|
| | | DFG MAK samplin g aerosols a) | BIA 7284 (+BIA 6013) | MTA/MA -014/A11 | MetroPo I M-274, M 278, M-279, M-281 ^{b)} | IRSST 48- 1 | IRSST MA-373 | OSHA PV 2121 | NIOSH 0500 | NIOSH 0501 | NIOSH 0600 | O'Conno r et al. 2014 | Champ martin et al. 2014 | Kerr et al. 2002 |
| PVC | Ø25 | | | | | 25 (u analytique = 4) | | | | | | | | |
| | Ø37 | | | 17 (PS 5, Uanalytiq ue=3) | 47-67 (R=1) | 25 (u analytique = 4) | | 66 | 100 (PS 5)* | | 100 (PS 5, Ø ?) | | | 333 (PS = 5) |
| | capsule int. Ø37 | | | | | | | | | 250 (PS = 2 à 5) | 250 (PS = 5) | 150 à 377 (PS = 5=) | | |
| | cassette IOM Inox+ Ø25 | | | | | | 40 (PS = 5, Uglobale = 9,9) | | | | | | | 333 (PS = 5) |
| EC | Ø25 | | | | | | | | | | | | | |
| | Ø37 | 500 et 1000 (PS 8) | | | (R=1) | | | | | | | | | |
| | capsule int. Ø37 | | | | 150-376 (R>>1) | | | | | | | | 150 à 377 (PS = 0,8) | |
| Fibres de verre | Ø25 | 400 | | 57 (PS 1, Uanalytiq ue=11) | | | | | | | | | | |
| | Ø37 | 1000 | 1000 | 78 (PS 1, Uanalytiq ue=16) | 30-210 (R=3) | | | | | | | | | 184 (PS = 1) |

| SUPPORTS | CARACTERISTIQUES | PROTOCOLES / ARTICLES | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------|--|-------------------------------|----------------------------------|--|----------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|
| | | DFG MAK samplin g aerosols a) | BIA 7284 (+BIA 6013) | MTA/MA -014/A11 | MetroPo I M-274, M 278, M-279, M-281 ^{b)} | IRSST 48- 1 | IRSST MA-373 | OSHA PV 2121 | NIOSH 0500 | NIOSH 0501 | NIOSH 0600 | O'Conno r et al. 2014 | Champ martin et al. 2014 | Kerr et al. 2002 |
| | cassette IOM plastique + Ø25 | | | 92 (PS 1, Uanalytiq ue=18) | | | | | | | | | | |
| | cassette IOM acier + Ø25 | | | 64 (PS 1, Uanalytiq ue=13) | | | | | | | | | | |
| fibres de quartz | Ø25 | | | | | | | | | | | | | |
| | Ø37 | 333 et 300 | | | 30-210 (R=3) | | | | | | | | | |
| Mousse Polyurethan e | coupelle CIP 10 | 3330 | | | 463 et 517 (Uanalyti que = 20) | | | | | | | | | |
| En italique : LQ estimées à partir des LD - ^{a)} 3 méthodes de détermination de LD - ^{b)} selon la norme NF ISO 15767 - * : pas plus de 2 mg sur le support – n : entre () : informations complémentaires avec porosité (PS en µm) incertitude élargie (U) Rétention (R en mg.cm ⁻²) | | | | | | | | | | | | | | |

Annexe 2 : Données issues de la littérature relatives aux dispositifs de prélèvements de la fraction inhalable

Annexe 2.1 : Descriptif des études identifiées de comparaison des dispositifs de prélèvement à la fraction conventionnelle inhalable ou de comparaison entre différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|-------------------------------|---|---------------------------------|--|--|
| Tsai <i>et al.</i> , 1995 | Comparaison interdispositifs | IOM CFC | <p>Etude terrain : mesures simultanée d'exposition individuelle à l'aide de l'IOM et la CFC dans l'industrie de production primaire du nickel. Mesures réalisées dans différentes industries, différents types d'activité (extraction, broyage, fonderie, raffinage) et différents postes de travail. 157 paires de prélèvement réalisés.</p> <p>Gravimétrie (IOM : cassette+filtre, CFC : filtre) + analyse de Ni par ICP-AES (CFC : minéralisation du filtre uniquement, IOM : minéralisation du filtre + essuyage des parois)</p> <p>Positionnement des préleveurs sur les revers de vestes des travailleurs (aléatoirement de chaque côté).</p> <p>Orientation non précisée.</p> <p>Débits testés : IOM : 2 L.min⁻¹ ; CFC : non précisé</p> <p>Pas d'information sur la nature du filtre utilisé, ni du type d'IOM utilisé. CFC en plastique.</p> | étude financée par industrie du nickel |
| Kalatoor <i>et al.</i> , 1995 | Mise au point d'un prototype de préleveur | Button (prototype) CFC-25 mm | <p>Etude en tunnel aéraulique.</p> <p>Prototype Button, CFC-25 mm : débit : 2 L.min⁻¹</p> <p>Filtres PVC</p> <p>Orientation : entrée horizontale face au flux d'air, entrée vers le bas (angle 45° ou 90° par rapport au flux d'air)</p> | - |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|---|---|--|---|--|
| | | | <p>Aérosol : aérosol monodispersé uranine 17, 26 et 38 μm</p> <p>Vitesse d'air : 1 à 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$</p> <p>Analyse à l'aide d'un fluorimètre (concentration obtenue en divisant le nombre de particules collectées par le volume d'air échantillonné).</p> | |
| Werner <i>et al.</i> , 1996 | revue des facteurs de conversion IOM/CFC | IOM CFC | <p>Comparaison des résultats de différentes études ayant mesuré en parallèle la fraction totale via la cassette fermée 37 mm et la fraction inhalable déterminée à l'aide de l'IOM, dans différents types d'industries (Ni, Pb, Al, Cd, brouillards d'huile, poussières de bois). Détermination d'un ratio « type » $C_{\text{IOM}}/C_{\text{CFC}}$ par type d'environnement.</p> <p>Les conditions de mesures ne sont pas décrites.</p> | Etude partiellement financée par l'industrie du nickel et du zinc. |
| Kenny, Aitken, <i>et al.</i> , 1997 Woehkenberg <i>et al.</i> , 1998 | Comparaison de différents dispositifs à la convention inhalable | IOM-plastique CFC CIP 10 – V1 GSP PAS 6 7-hole Perspec | <p>Etude en tunnel aéraulique</p> <p>Dispositifs placés sur mannequin (devant et derrière) respirant taille réelle (20L/min), en rotation.</p> <p>La respiration du mannequin a été arrêtée pendant les prélèvements car induisait un effet selon le positionnement du dispositif de prélèvement.</p> <p>Sonde de référence isocinétique.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vitesse d'air : 0,5, 1 ou 4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ▪ Aérosol : monodispersé oxyde d'aluminium, 9 tailles de 7 à 100 μm, concentration 200-300 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 3 à 5 mg ▪ Dépôt sur les parois non pris en compte ▪ Débit testé : IOM, CFC, PAS 6, | |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|----------------------------|---|--|---|--|
| | | | <p>perspec, 7-hole : 2 L.min⁻¹, GSP : 3,5 L.min⁻¹, CIP-10-v1 : 10 L.min⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> 7-hole : un métallique, deux autres en plastique, CFC : peinture conductrice pour limiter effet électrostatique <p>7-hole, GSP : pesée filtre + cassette , perspec : brossage des parois pour récupérer le dépôt, IOM (plastique)</p> | |
| Kenny <i>et al.</i> , 1999 | Comparaison de différents dispositifs à la convention inhalable | <p>IOM – inox ou plastique</p> <p>CFC</p> <p>GSP</p> <p>7-hole</p> | <p>Etude en tunnel aéraulique</p> <p>Dispositifs placés sur mannequin (devant et derrière) en rotation ou bien isolés.</p> <p>Sonde de référence circulaire.</p> <ul style="list-style-type: none"> Vitesse d'air : très faible (non mesurable) Aérosol : monodispersé oxyde d'aluminium (Aloxite), MMAD de 6 à 90 µm (GSD = 1,2 à 1,4) Dépôt sur les parois non pris en compte Débit testé : IOM, CFC, 7-hole : 2 L.min⁻¹, GSP : 3,5 L.min⁻¹, IOM inox ou plastique, 7-hole : filtres en fibres de verre 25 mm – GSP et CFC : filtres en fibres de verre 37mm. CFC orientée à 45° vers le bas. <p>IOM, GSP et 7-hole : orifices orientés verticalement</p> | - |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Comparaison de différents dispositifs à | <p>IOM</p> <p>CFC</p> | Etude en tunnel aéraulique horizontal de différents | Débit pour le Button inférieur à celui habituellement mis en |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|---|---|-------------------------------------|---|--|
| | la convention inhalable | Button CIS Respicon 7-hole | dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable Dispositifs placés sur un mannequin Mesure de référence à l'aide d'une sonde isocinétique. 3 orientations testées : 0° (ouverture face au flux d'air), 90° (ouverture perpendiculaire au flux d'air), 180° (ouverture dos au flux d'air). Vitesse d'air : 0,55 ou 1 m.s ⁻¹ Quantification des pertes sur les parois pour tous les dispositifs testés hormis l'IOM particules solides (ammonium fluoresceine), monodispersées, 5 à 68 µm débit testé : IOM, 7-hole, CFC, Button : 2 L.min ⁻¹ , CIS : 3,5 L.min ⁻¹ , respicon : 3,1 L.min ⁻¹ Le type d'IOM (plastique ou inox) n'est pas mentionné. | œuvre (2 contre 4 L.min ⁻¹). |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000b | Comparaison de différents dispositifs à la convention inhalable | Button GSP IOM CFC | Etude en tunnel aéraulique horizontal de différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable Dispositifs placés sur un mannequin Mesure de référence à l'aide d'une sonde isocinétique. 3 orientations testées : 0° (ouverture face au flux d'air), 90° (ouverture perpendiculaire au flux d'air), 180° (ouverture dos au flux d'air). Vitesse d'air : 0,5 ou 2 m.s ⁻¹ Particules d'oxyde d'aluminium de 7, 29 et 70 µm (GSD =1,35) débit testé : IOM, 7-hole, CFC : non renseigné. Button : 4 L.min ⁻¹ | - |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|---|--|----------------------------------|---|------------------------------|
| | | | GSP, IOM et CFC : plastique. | |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000a | Comparaison de différents dispositifs à la convention inhalable | IOM-inox CFC Button GSP | <p>Etude comparative, 2 protocoles d'essais : dispositifs de prélèvement disposés sur mannequin taille réelle et sur torse simplifié.</p> <p>Vitesse d'air : 0,5 ou 2 m.s⁻¹</p> <p>Comparaison des données avec résultats de Kenny <i>et al.</i> 1997. Etude de différents facteurs, influence: taille particule, orientation, type d'échantillonneur, vitesse air</p> <p>Orientation du dispositif : angle/flux d'air 0°, 90° ou 180°.</p> <p>Débit testé : IOM : 2 L.min⁻¹, CFC : 2,25 L.min⁻¹, GSP : 3,5 L.min⁻¹, Button : 4 L.min⁻¹</p> <p>Aérosol : Al₂O₃ monodispersé - 7 µm (1,35), 29 µm (1,35), 70 µm (1,335)</p> | |
| Aizenberg <i>et al.</i> , 2001 | comparaison à la convention inhalable + comportement particules de grande taille | IOM - inox GSP Button | <p>Etude en tunnel aéraulique de petite dimension, avec mannequin simplifié.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentration de référence estimée à l'aide de plateaux de sédimentation et d'une estimation de la vitesse de sédimentation en fonction du MMAD., ▪ Aérosol : particules d'oxyde d'aluminium : MMAD (GSD) : 65 µm (1,44), 96 µm(1,36), 165 µm (1,3), 241 µm (1,3) ▪ 3 orientations testées : 0° (entrée face au flux d'air), 90° ou 270°(entrée perpendiculaire | |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|----------------------------|--|--|---|------------------------------|
| | | | <p>au flux d'air), 180° (entrée dos au flux d'air). Calcul d'une efficacité moyenne (moyenne des orientations Emoy = ¼ (E0+2*E90+E180)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vitesses d'air : 0,5 et 1 m.s⁻¹ ▪ Débits testés : IOM : 2 L.min⁻¹ ; GSP : 3,5 L.min⁻¹, Button : 4 L.min⁻¹ <p>Filtres en fibres de verre (37 mm pour GSP et 25 mm pour IOM et Button)</p> | |
| Tatum <i>et al.</i> , 2001 | Etude de répétabilité et de comparaison interdispositifs | IOM-inox CFC CIS 7-hole Impacteur en cascade | <p>Etude terrain dans l'industrie du bois</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ essai 1 : évaluation de la répétabilité (6 mesures). Mesures poste fixe sur chariot élévateur. 4 lieux 3 types d'industrie ▪ essai 2 : performance relative des différents échantillonneurs. Mesures poste fixe sur chariot élévateur. 4 lieux 3 types d'industrie ▪ essai 3 : comparaison performance relative différents échantillonneurs vs CFC et impacteur en cascade (0,4 à 31 µm, 7 plateaux graisse silicone, filtre final PVC). 17 mesures croisées, 12 lieux, 4 types d'industries ▪ dissipation électricité statique source ionique | |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|------------------------------|------------------------------|------------------------|--|------------------------------|
| | | | dispositifs : IOM avec cassette inox, 7-hole et CIS en plastique conducteur, CFC en polystyrène. Filtrés utilisés : PVC (diamètre pore 5 µm). Débits testés : IOM, 7-hole et CFC : 2 L.min ⁻¹ ; CIS : 3,5 L.min ⁻¹ | |
| Demange <i>et al.</i> , 2002 | Comparaison interdispositifs | IOM - plastique CFC | <p>Etude terrain, secteur métallurgie</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ atelier 1 (fonderie bronze) - fumées (granulométrie < 1µm, pas de mesure mais génération de fumées). Mesures simultanées à poste fixe avec 2 CFC à 1 L.min⁻¹ et 2 IOM à 2 L.min⁻¹ ▪ atelier 2 (atelier d'ébavurage et de meulage, usinage de fonte) - granulométrie déterminée par impacteur Marple. Mesures simultanée à poste fixe : CFC à 1 L.min⁻¹, IOM à 2 L.min⁻¹, OFC à 25 L.min⁻¹, impacteur marple à 2 L.min⁻¹, IOM à 2 L ;min⁻¹, CFC à 2 L.min⁻¹ ▪ atelier 3 (atelier d'ébavurage et de meulage, usinage de fonte grise) - granulométrie déterminée par impacteur Marple. Mesures simultanées à poste fixe : CFC à 1 L.min⁻¹, IOM à 2 L.min⁻¹, OFC à 25 L.min⁻¹, impacteur marple à 2 L.min⁻¹, IOM à 2 L ;min⁻¹, CFC à 2 L.min⁻¹ ▪ résultats rapportés : ratio | |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|--------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|
| | | | <p>des concentrations</p> <ul style="list-style-type: none"> IOM : prise en compte dépôt sur parois ; CFC : non prise en compte dépôt sur les parois pour poussières, prise en compte pour analyse de métaux. <p>Dispositifs utilisés : IOM, CFC. Filtres utilisés : fibres de quartz.</p> | |
| Harper et Muller, 2002 | Comparaison interdispositifs | IOM - inox CFC Button | <p>3 industries du bois, différentes tâches investiguées. Mesures individuelles par paire (IOM/CFC, IOM/Button, CFC/Button) Tests statistiques pour dimensionner étude et interpréter données.</p> <p>Vitesse d'air : 0,26 à 0,59 m.s⁻¹</p> <p>0,34 à 237 mg.m⁻³ (IOM)</p> <p>0,69 à 14 mg.m⁻³ (Button)</p> <p>Débits testés : IOM et CFC : 2 L.min⁻¹, Button : 4 L.min⁻¹</p> <p>Orientations : IOM et Button entrée horizontale, CFC : entrée inclinée à 45° vers le bas</p> | |
| Harper, Muller, <i>et al.</i> , 2002 | Comparaison interdispositifs | IOM - inox CFC Button | <p>Etude de terrain. Industrie du bois</p> <p>Objectif : analyser la taille des particules collectées par les différents échantillonneurs : Remise en suspension des particules collectées puis déposition sur une membrane en esters de cellulose, puis détermination des diamètres aérodynamiques au microscope optique.</p> <p>Masse prélevée non déterminée car incompatible avec analyse microscopique.</p> | |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|---|------------------------------|
| | | | <p>Prélèvements individuels, par paire. 202 mesures.</p> <p>Filtres PVC 25 mm pour IOM et Button et 37 mm pour CFC.</p> <p>Débits : IOM et CFC : 2 L.min⁻¹ et Button : 4 L.min⁻¹</p> <p>Vitesse d'air similaires aux vitesse d'air généralement rencontrées sur les lieux de travail (plus faible que celles utilisées pour les études terrain).</p> <p>Résultats préliminaires sur 19 échantillons.</p> | |
| Kerr <i>et al.</i> , 2002 | Comparaison interdispositifs | IOM - inox CFC GSP | <p>Etude terrain</p> <p>Mesures réalisées dans 8 usines de fabrication de noir de carbone, prélèvements individuels, mesures par paire</p> <p>comparaison IOM/CFC : 75 mesures – 6 usines</p> <p>Comparaison GSP/CFC : 32 mesures – 4 usines</p> <p>comparaison IOM/GSP : 25 mesures – 4 usines</p> <p>durée des prélèvements : 2 à 48h</p> <p>débits : IOM, CFC : 2 L.min⁻¹, GSP : 3,5 L.min⁻¹</p> <p>orientation : IOM et GSP : entrée horizontale, CFC : entrée vers le bas</p> <p>IOM cassette inox.</p> <p>IOM : filtre PVC 25 mm (5µm pores), CFC : filtre PVC 37 mm (5 µm pores), GSP : filtre fibres de verre 37 mm (1µm pores)</p> | |
| Calzavara <i>et al.</i> , 2003 | Comparaison interdispositifs | IOM - inox CFC | <p>Etude terrain : Mesures simultanées IOM et CFC dans 19 usines de fabrication d'asphalte.</p> <p>55 paires d'échantillons individuels (32 > LOD) (durée moyenne 405 min), 17 paires échantillons poste fixe (9 > LOD).</p> <p>Débits : 1 à 2,2 L.min⁻¹</p> | |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|------------------------------|------------------------------|---|---|------------------------------|
| | | | <p>IOM : plastique conducteur, cassette inox, filtre en fibres de verre 25 mm (pore : 1 μm). Pesée filtre + cassette</p> <p>CFC : cassette 2 pièces polystyrène, filtre PTFE (pore : 2 μm) – pesée uniquement du filtre</p> <p>Extraction benzène selon NIOSH 5042 pour CFC et IOM => analyse uniquement du filtre.</p> <p>Traitement statistique : T-test (hypothèse nulle d'absence de différence significative : 95% confiance (p=0,05)) + détermination régression linéaire</p> <p>fumées asphalte (granulométrie 97 à 99,7% < 12,5 μm)</p> <p>détermination de la masse prélevée + masse de particules solubles dans le benzène.</p> | |
| Carlton, 2003 | comparaison interdispositifs | IOM - plastique CFC modifiée (entrée 15mm) | <p>Etude terrain : prélèvements individuels simultanés IOM et CFC modifiée (inlet 15 mm), échantillonneurs positionnés sur le torse avec entrée horizontale (perpendiculaire au torse) – Opération de sablage d'un aéroplane dans une installation fermée.</p> <p>Débits : 2 L.min⁻¹</p> <p>Nature de l'aérosol : chromate de strontium</p> <p>Comparaison IOM / CFC modifiée : régression linéaire moindre carrés</p> | |
| Teikari <i>et al.</i> , 2003 | comparaison interdispositifs | IOM CFC Respicon Dekati Grimm | <p>Etude en laboratoire (en chambre, poste fixe) et usine production talc (poste fixe) visant à évaluer l'efficacité des impacteurs vis-à-vis des fractions conventionnelles (I, T, A). Données reportées ici concernent uniquement fraction Inhalable.</p> | |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---|------------------------------|
| | | | <p>Choix de l'IOM comme préleveur de référence de la fraction inhalable.</p> <p>Mesure distribution granulométrique dans la chambre par impacteur ELPI : 0,0 3 à 10 µm.</p> <p>Compteur Grimm : 0,5 - 1 - 2 - 3,5 - 5 - 7,5 - 10 et 15 µm. backup filtre téflon 47 mm)</p> <p>Aucune neutralisation électrique réalisée</p> <p>Le type d'IOM (plastique ou inox) n'est pas mentionné.</p> | |
| Paik <i>et al.</i> , 2004 | Comparaison à la convention inhalable | IOM IOM inlet 7,9 mm | <p>Etude en tunnel, échelle réduite, échantillonneur positionné sur un corps non profilé (simulation torse) de 120*60 mm, rotation 2 tr/min,</p> <p>Autre dispositif testé : IOM inlet réduit à 7,9mm.</p> <p>Etude de l'efficacité d'aspiration en fonction du nombre de Stokes, du ratio de dimensions (entre le diamètre de l'entrée de l'IOM et la largeur du mannequin) et du ratio de vitesse (entre la vitesse d'air dans le flux et la vitesse à la surface de l'entrée de l'IOM).</p> <p>Graphique efficacité d'aspiration = f(Dae).</p> <p>Débits testés : 0,71 L.min⁻¹, 2 et 5,71 L.min⁻¹</p> <p>Vitesse d'air : 1 m.s⁻¹</p> <p>Aérosol : poudre silice fondue, MMAD 6 à 90 µm (GSD < 1,3)</p> <p>Le type d'IOM (plastique ou inox) n'est pas mentionné.</p> | |
| Witschger <i>et al.</i> , 2004 | Comparaison à la convention inhalable | IOM - inox CFC-25 mm Button | <p>Objectifs : mise au point d'un nouveau protocole pour mesurer l'efficacité d'échantillonnage des échantillonneurs de la fraction inhalable, face au flux d'air, à des vitesses d'air très faibles. Puis</p> | |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|-------------------------------|---|---|---|---|
| | | | <p>évaluation de 3 dispositifs (IOM, CFC 25 mm et GSP) selon ce protocole.</p> <p>Etude en chambre, génération de l'aérosol en rotation. Mesures réalisées à poste fixe (échantillonneurs positionnés en cercle autour du générateur d'aérosol).</p> <p>Vitesse d'air : $\ll 0,027 \text{ m.s}^{-1}$</p> <p>Aérosol : Al_2O_3, MMAD (GSD) : $6,9 \mu\text{m}(1,4)$; $14,1 \mu\text{m}(1,3)$; $28,4 \mu\text{m}(1,3)$; $38,7 \mu\text{m}(1,5)$; $60,1 \mu\text{m}(1,3)$; $76 \mu\text{m}(1,2)$</p> <p>IOM avec cassette inox</p> <p>Débits testés : CFC-25 mm : 1 L.min^{-1}, IOM : 2 L.min^{-1}, Button : 4 L.min^{-1}</p> <p>Orientations : CFC-25 mm : entrée orientée vers le bas (environ 45°), IOM et Button : entrée horizontale.</p> | |
| Brixey <i>et al.</i> , 2005 | Modification dispositif | IOM – Inlet 11 mm | <p>Objectif de l'étude : examiner si une version à une échelle réduite de l'échantillonneur de l'IOM pourrait être testée dans la petite soufflerie mise au point par les auteurs et présenter des performances (en termes d'efficacité d'aspiration) qui correspondent à celles de la version pleine échelle testée dans des conditions grandeur nature (selon les résultats publiés précédemment par Mark et Vincent 1986 et Kenny <i>et al.</i> 1997).</p> | |
| de Vocht <i>et al.</i> , 2006 | Comparaison des différents dispositifs avec Caltool | IOM PAS-6 7-Hole (OFC, Echantillonneur polonais) | <p>Etude terrain : mesures dans 4 usines de fabrication de caoutchouc, lors d'opérations de mélange (milling/mixing). Utilisation du dispositif Caltool comme référence.</p> <p>Aérosol : mélange de substances chimiques : prédominance larges particules $\text{Dae} > 10 \mu\text{m}$</p> | <p>Résultats pour l'échantillonneur polonais non repris car échantillonneur non courant.</p> <p>Résultats pour OFC non repris car non considéré comme échantillonneur de la fraction inhalable.</p> |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|------------------------------|---|-------------------|--|--|
| | | | <p>polymérisation : fumées de caoutchouc Dae < 10 µm.</p> <p>Vitesse d'air : < 0,1 m/s : 49%, < 0,25 m/s : 83%, > 0,5 m/s (0,69m/s) : 1 mesure</p> <p>Débits testés : 2 L.min⁻¹</p> <p>Dispositifs positionnés sur Caltool : IOM, PAS-6, 7-hole (OFC, échantillonneur polonais)</p> <p>Filtres utilisés en fibres de verre, filtres déchargés.</p> <p>Orientations : entrée horizontale pour IOM et 7-hole, entrée pointant vers le bas (angle env 45°) pour PAS-6 et OFC, vers le bas (angle environ 90°) pour l'échantillonneur polonais.</p> <p>Le type d'IOM (plastique ou inox) n'est pas mentionné.</p> | |
| Görner <i>et al.</i> , 2009 | Comparaison de différents dispositifs à la fraction inhalable et comparaison interdispositifs | IOM CIP10-I-V2 | <p>tunnel aéraulique, mannequin cylindrique (110 mm long, 55 mm large), en rotation 2 tr/min</p> <p>aréosol polydispersé, Dae déterminé par la technique Comptage Coulter</p> <p>Sonde de référence isocinétique</p> <p>Vitesse d'air = 1m.s⁻¹</p> <p>Aérosol : billes de verre, aérosol polydispersé : MMAD 1 à 25 µm (pas de 1µm) et GSD de 1,5 à 3,5 (pas de 0,25)</p> <p>Débits testés : IOM : 2 L.min⁻¹, CIP-10-I V2 : 10 L.min⁻¹</p> <p>Le type d'IOM (plastique ou inox) n'est pas mentionné</p> | |
| Deygout <i>et al.</i> , 2010 | Comparaison interdispositifs | IOM-inox CFC | <p>Etude terrain. Mesures individuelles simultanées lors d'opérations de couverture de chaussée (asphalte).</p> <p>Vitesse de l'air : 1,5 à 5 m.s.⁻¹</p> | Etude financée par l'industrie du bitume |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|------------------------------|--|---|--|--|
| | | | <p>Température de l'asphalte : 146 à 170°C, température extérieure : 10 à 25°C.</p> <p>IOM avec cassette inox et filtre en fibres de verre, CFC avec membrane en PTFE.</p> | |
| Görner <i>et al.</i> , 2010 | comparaison de différents dispositifs à la convention inhalable (et à l'inhalabilité en air calme) | <p>IOM - plastique</p> <p>CFC</p> <p>CFC+ capsule interne</p> <p>CIP10-I-V1</p> <p>CIP10-I-V2</p> <p>Button</p> | <p>Etude en tunnel aéraulique.</p> <p>Mesure sur mannequin, rotation 2 tr/min dans un tunnel horizontal pour vitesse d'air 1 m.s.⁻¹ ou vertical pour air calme.</p> <p>Mesure de référence à l'aide d'une sonde isocinétique dans le tunnel horizontal et d'une sonde tournée verticalement vers le haut dans le tunnel vertical.</p> <p>Aérosol : micro-billes de verre – MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm). Charges électriques de l'aérosol neutralisées.</p> <p>Débits : IOM, CFC, CFC + capsule interne = 2 L.min⁻¹, CIP10-I-V1 et V2 : 10 L.min⁻¹, Button : 4 L.min⁻¹</p> <p>Orientation du dispositif : entrée horizontale, parallèle au flux d'air dans le tunnel horizontal, perpendiculaire au flux d'air dans le tunnel vertical.</p> <p>Filtre nuclépore 25 mm (pores 2 µm) ou 37 mm (pores 0,8 µm)</p> <p>L'étude n'a pas réellement été réalisée avec une capsule interne, mais en considérant les particules prélevées sur le filtre et récupérées sur les parois de la cassette.</p> | Les résultats relatifs à l'inhalabilité en air calme ne sont pas reportés ici, car l'objectif est d'évaluer les dispositifs aux regard de la fraction conventionnelle. |
| Kauffer <i>et al.</i> , 2010 | Comparaison de différents dispositifs avec Caltool et avec CFC | <p>IOM - inox</p> <p>CFC</p> <p>CFC+ capsule interne</p> <p>CIP10-I-V1</p> <p>Button</p> | <p>Etude terrain. Mesures dans 7 industries du bois.</p> <p>Aspiration Caltool = 20 L.min⁻¹</p> <p>Comparaison avec Caltool : mesures statiques dans 5</p> | dispositif Caltool représentatif de l'exposition d'une personne au même endroit, dans les mêmes conditions expérimentales. |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|-----------------------------|--|----------------------------------|--|--|
| | (comparaison avec inhalabilité en air calme) | | industries, échantillonneurs positionnés sur le système Caltool. Comparaison avec la CFC : prélèvements individuels (mesures simultanées avec CFC et échantillonneur à tester), ou statiques (mesures simultanées avec plusieurs échantillonneurs, à 1,6 m du sol) dans 6 industries Aérosol : poussières de bois, VMAD = 13 à 28 μm , 22 à 67 μm Débits : CFC : 1 L.min ⁻¹ ; IOM, CFC + capsule interne = 2 L.min ⁻¹ , CIP10-I-V1 et V2 : 10 L.min ⁻¹ , Button : 4 L.min ⁻¹ Orientation des dispositifs : non précisée IOM cassettes inox, filtre PVC 25 mm (pore 5 μm), CFC +capsule interne filtre esters de cellulose 37 mm (pore 0,8 μm), Button filtre PVC 25 mm (pore 5 μm), CFC filtre PVC 37 mm (pore 5 μm), Caltool filtre PVC 47 mm (pore 5 μm). Vitesse d'air : quelques dixièmes de mètres par seconde. | Résultats Caltool proches inhalabilité air calme proposé par Aitken <i>et al.</i> , 1999 |
| Sleeth <i>et al.</i> , 2012 | Comparaison à la convention inhalable | IOM-inox CFC GSP Button | Etude en tunnel aéraulique. Vitesse d'air ultra basse, mannequin chauffé et respirant en rotation à 2 tr /min. Le mannequin est muni d'un filtre de 47 mm, et les particules déposées sur les parois de l'entrée du mannequin sont récupérées. Sonde de référence isocinétique. L'étude présente également des comparaisons avec inhalabilité déterminée par le mannequin. IOM cassette inox, Button : filtre 25 mm en fibres de verre, | |

| Référence | Type d'étude | Dispositif testés | Objectifs et conditions de l'étude | Informations complémentaires |
|-------------------------------|-------------------------------|---|---|---|
| | | | <p>GSP version CIS plastique, CFC : filtre 37 mm en fibres de verre</p> <p>Orientations : IOM, Button, GSP : entrée horizontale – CFC : entrée orientée à 45° vers le bas.</p> <p>Débits : IOM, CFC : 2 L.min⁻¹ ; GSP : 3,5 L.min⁻¹, Button : 4 L.min⁻¹.</p> <p>Aérosol : silice fondue, MMAD de 9,6 à 89,5 µm</p> <p>Vitesses d'air : 0,1 m.s⁻¹, 0,24 et 0,42 m.s⁻¹</p> | |
| Skaugset <i>et al.</i> , 2013 | Comparaisons interdispositifs | IOM-plastique CFC – 25mm Respicon | <p>Etude terrain dans l'industrie de l'aluminium.</p> <p>Mesures individuelles comparatives par paire IOM / respicon et IOM/CFC-25 mm dans industrie Al (également CFC et Respicon thoracique, non reportées ici)</p> <p>2275 mesures, durée moyenne : 391 min</p> <p>Débits : Respicon : 3,11 L.min⁻¹</p> <p>Respicon, CFC-25 mm : filtre PVC (pore 5 µm), IOM : filtre esters de cellulose (pore 5 µm)</p> <p>Les filtres et cassettes sont déchargés électriquement</p> | Etude financée par industrie de l'aluminium |

Annexe 2.2 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement de l'IOM à la convention inhalable

Dans les tableaux suivants :

- E : Efficacité de prélèvement (% de la masse de particules)
- B = biais par rapport à la convention = écart à la courbe conventionnelle pour un diamètre donné (%) déterminé par la relation suivante :

$$B = \frac{E_{\text{dispositif}} - E_{\text{convention}}}{E_{\text{convention}}} * 100$$

- Résultats reportés en rouge : sous-estimation, biais négatif supérieure à 10%
- Résultats reportés en verts : biais compris entre ± 10%
- Résultats reportés en bleu : surestimation, biais positif supérieur à 10%

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-------------------------------------|---|-------------------------------|--|---|
| Kenny, Aitken, <i>et al.</i> , 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 0,5 | Détermination graphique. 7 µm : E = 70%, B = -16% 8 µm : E = 85%, B = 5% 20 µm : E = 87%, B = 34% 21 µm : E = 95%, B = 48% 23,5 µm : E = 80%, B = 29% 31 µm : E = 75%, B = 30% 42 µm : E = 65%, B = 20% 55 µm : E = 57%, B = 10% 85 µm : E = 75%, B = 49% 100 µm : E = 85%, B = 70% ⇒ B = -16% (7 µm), +5% (8 µm), +10 à +70% (20 à 100 µm) | Sur-échantillonnage |
| Kenny, Aitken, <i>et al.</i> , 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | Détermination graphique. 8 µm : E = 70%, B = -14% 20 µm : E = 58%, B = -11% 21 µm : E = 61%, B = -5% 23,5 µm : E = 52%, B = -16% 31 µm : E = 48%, B = -17% 42 µm : E = 39%, B = -28% 55 µm : E = 40%, B = -23% 85 µm : E = 42%, B = -17% 100 µm : E = 42%, B = -16% ⇒ B = -5 à -28% (8 – 100 µm) | Sous-échantillonnage |
| Kenny, Aitken, <i>et al.</i> , 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 4 | Détermination graphique. 7 µm : E = 50%, B = -40% 20 µm : E = 38%, B = -42% 21 µm : E = 30%, B = -53% 23,5 µm : E = 25%, B = -60% 31 µm : E = 24%, B = -58% 42 µm : E = 15%, B = -72% 55 µm : E = 40%, B = -23% 85 µm : E = 55%, B = 9% 100 µm : E = 85%, B = 70% ⇒ B = -23 à -72% (7- 55 µm), +9 à +70 (85 – 100 µm) | Sous-échantillonnage jusqu'à environ 70 µm, puis sur-échantillonnage. |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|----------------------------|---|-------------------------------|--|---|
| Kenny <i>et al.</i> , 1999 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | Très faible (non mesurable) | <p>échantillonneur isolé :</p> <p>6 µm : E = 94,18%, B = 11%</p> <p>18 µm : E = 90,99%, B = 36%</p> <p>26 µm : E = 82%, B = 36%</p> <p>34 µm : E = 83,06%, B = 47%</p> <p>46 µm : E = 80,86%, B = 52%</p> <p>58 µm : E = 83,01%, B = 61%</p> <p>74 µm : E = 74,6%, B = 47%</p> <p>90 µm : E = 58,2%, B = 16%</p> <p>B = +11 à +61% (6 - 90 µm)</p> <p>échantillonneur plusieurs positions sur mannequin, résultat moyenne des positions</p> <p>6 µm : E = 93,6%, B = 10%</p> <p>26 µm : E = 91,3%, B = 51%</p> <p>58 µm : E = 82,6%, B = 60%</p> <p>74 µm : E = 90%, B = 78%</p> <p>90 µm : E = 94,6%, B = 88%</p> <p>B = +10 à +88% (6 - 90 µm)</p> | - |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 0,55 | <p>Détermination graphique.</p> <p>Pas de perte car pesée filtre+cassette</p> <p>2µm : E = 100%, B = +6%</p> <p>5µm : E = 100%, B = + 15%</p> <p>10µm : E = 100%, B = + 29% ;</p> <p>20µm E = 115%, B = + 77%</p> <p>40µm E = 120 à 130%, B = + 120 à 140 %</p> <p>68µm : E = 150 à 225%, B = + 195 à 340 %</p> <p>B = +6 à +15% (2-5 µm), +29 à + 340 % (10 - 68 µm)</p> | Sur-échantillonnage, E augmente quand D augmente. |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 0,55 | <p>Détermination graphique.</p> <p>Pas de perte car pesée filtre+cassette</p> <p>Diminution E de 100% à 0% quand D augmente.</p> <p>Sous-échantillonnage à partir de D entre 10 et 20 µm.</p> <p>2 µm : ND</p> <p>5 µm : E = 95%, B = + 9%</p> <p>10 µm : E = 100%, B = + 29%</p> <p>20 µm : E = 25-40%, B = -39 à -62%</p> <p>40 µm : E = 20%, B = - 63%</p> <p>68 µm : E = 0%, B = - 100%</p> <p>B = +9% (5 µm), +29% (10 µm), -39 à -100% (20 à 68 µm)</p> | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, à l'opposé du flux d'air (180°) | 0,55 | <p>Détermination graphique.</p> <p>Pas de perte car pesée filtre+cassette</p> <p>Diminution E de 100% à 0% quand D augmente.</p> <p>Sous-échantillonnage à partir de D entre 10 et 20 µm.</p> <p>2 µm : ND</p> <p>5 µm : E = 100% , B = + 15%</p> <p>10 µm : E = 100%, B = + 29%</p> <p>20 µm : E = 55%, B = - 16%</p> <p>40 µm : E = 30%, B = - 45%</p> <p>68 µm : E = 0%, B = - 100%</p> <p>=>B = +15 à +29 % (5 à 10 µm), -16 à -100% (20 à 68 µm)</p> | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|---|---|-------------------------------|---|--|
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 1 | Détermination graphique. Pas de perte car pesée filtre+cassette 2 µm : E = 100%, B = + 6% 5 µm : E = 100%, B = + 15% 10 µm : E = 110%, B = + 42 % ; 20 µm E = 130 à 140%, B = + 99 à +115% 40 µm E = 225 à 250%, B = + 310 à +360% 68 µm : E = 325 à 350%, B = +540 à +590% ⇒ B = +6 à +15% (2-5 µm), +42 à +590 % (10 – 68 µm) | Sur-échantillonnage, E augmente quand D augmente. |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 1 | Détermination graphique. Pas de perte car pesée filtre+cassette 2 µm : ND 5 µm : E = 100% , B = + 15% 10 µm : E = 80%, B = + 3% 20 µm : E = 20%, B = - 70% 40 µm : E = 5%, B = - 90% 68 µm : E = 0%, B = - 100% ⇒ B = +3 à +15% (5 -10 µm), - 70 à -100% (20 – 68 µm) | diminution E de 100% à 0% quand D augmente. Sous-échantillonnage dès que D est entre 10 et 20 µm. |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, à l'opposé du flux d'air (180°) | 1 | Détermination graphique. Pas de perte car pesée filtre+cassette 2 µm : ND 5 µm : E = 95 à 100% , B = + 9 à + 15% 10 µm : E = 100%, B = + 29% 20 µm : E = 55%, B = - 16% 40 µm : E = 30%, B = - 45% 68 µm : E = 0%, B = - 100% B = +9 à +15% (5 µm), +29 % (10 µm), - 16 à -100% (20 – 68 µm) | diminution E de 100% à 0% quand D augmente. Sous-échantillonnage dès que D est entre 10 et 20 µm. |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000b | Entrée horizontale Orientations 0°, 90°, 180° | 0,5 | 7 µm : E = 76%, B = -8% 29 µm : E = 60%, B = 2% 70 µm : E = 53%, B = 4% =>B = -8 à +4 % (7-70 µm) | Lecture graphique, résultat = moyenne des orientations |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000b | Entrée horizontale Orientations 0°, 90°, 180° | 2 | 7 µm : E = 59%, B = -29% 29 µm : E = 30%, B = -49% 70 µm : E = 71%, B = 40% => B = -29 à -49% (7, 29 µm) et +40 % (70 µm) | Lecture graphique, résultat = moyenne des orientations |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000a | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 0,5 | 70 µm : E = 92,2% , B = -8% (torse simplifié) | |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000a | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 0,5 | 70 µm : E = 10,2%, B= - 80 % (torse simplifié) | |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000a | Entrée horizontale, opposée au flux d'air (180°) | 0,5 | 70 µm : E =55%, B = + 8% (torse simplifié) | |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000a | Entrée horizontale, | 0,5 | Valeur moyennée selon les 3 directions (0, 90, 180°) Torse simplifié – Détermination graphique (hormis pour 70 µm) : | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|---|--|-------------------------------|--|------------------------------|
| | toutes directions | | <p>7 µm : E = 95%, B = + 15%</p> <p>29 µm : E = 80%, B = + 36%</p> <p>70 µm : E = 41,9%, B = - 17%</p> <p>Mannequin taille réelle – détermination graphique :</p> <p>7 µm : E = 79%, B = - 5%</p> <p>29 µm : E = 69%, B = + 17%</p> <p>70 µm : E = 52%, B = +2%</p> | |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000a | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 2 | 70 µm : E = + 344%, B = +578 % (torse simplifié) | |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000a | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 2 | 70 µm : E = 10,9%, B = - 79% (torse simplifié) | |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000a | Entrée horizontale, opposée au flux d'air (180°) | 2 | 70 µm : E = 41%, B = -19% (torse simplifié) | |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000a | Entrée horizontale, toutes directions | 2 | Valeur moyennée selon les 3 directions (0, 90, 180°) : 70 µm : E = 102%, B = 101 % (torse simplifié) | |
| Aizenberg <i>et al.</i> , 2001 | Entrée horizontale 0° : face au flux d'air 90°, 270° : perpendiculaire au flux d'air 180° : opposée au flux d'air | 0,5 | <p>Efficacité moyennée selon les orientations – Détermination graphique.</p> <p>65 µm : E = env. 50%, B = 0%</p> <p>96 µm : E = 70-75%, B = + 40%</p> <p>165 µm, E = 80%</p> <p>241 µm, E = 95%</p> | |
| Aizenberg <i>et al.</i> , 2001 | Entrée horizontale 0° : face au flux d'air 90°, 270° : perpendiculaire au flux d'air 180° : opposée au flux d'air | 1 | <p>Efficacité moyennée selon les orientations – Détermination graphique.</p> <p>65 µm : E = 45%, B = -12%</p> <p>96 µm : E = 65%, B = + 30%</p> <p>165 µm, E = 105%</p> <p>241 µm, E = 150%</p> | |
| Paik <i>et al.</i> , 2004 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | <p>Vitesse d'air = 1 m.s⁻¹, IOM à 2 L.min⁻¹ : Sur-échantillonnage :</p> <p>6 µm : E = 98 à 105 %, B = 15 à 24%</p> <p>13 µm : E = 106 à 113%, B = 45 à 55%</p> <p>34 µm, E = 57 à 72%, B = 1 à 27%</p> <p>89,5 µm : E = 60 à 82%, B = 19 à 63%</p> <p>⇒ B = + 1 à + 63 % (6 à 89,5 µm)</p> | |
| Görner <i>et al.</i> , 2009 | Entrée horizontale, | | Courbe efficacité et convention : comportement CIP 10 similaire à IOM (sur-échantillonnage jusqu'à environ 25 µm puis | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|--------------------------------|---|-------------------------------|--|---|
| | mannequin en rotation | | sous-échantillonnagesous-échantillonnage jusqu'à environ 42 µm) | |
| Witschger <i>et al.</i> , 2004 | Entrée horizontale, face à la source | <0,1 | efficacité > 100% pour toutes les tailles de particules Sur-échantillonnage 6,9 µm : E = 126%, B = +52% 14,1 µm : E = 160%, B = +124% (lecture graphique) 28,4 µm : E = 178 Estimation pour 5, 10 et 15 µm : B = +52%, +87%, +110%. ⇒ B = +52 à +201% (5-76 µm) Précision : RSD : 14% | |
| Görner <i>et al.</i> , 2010 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | B = +8,4% (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) C _{10M} /C _{conv} = 1,08 | La publication mentionnant les rapports des concentrations massiques de particules (concentration de l'échantillonneur testé C _{éch} sur la concentration de la sonde de référence C _{ref} , ainsi que la concentration d'un préleveur « idéal » C _{conv} sur la concentration de la sonde de référence C _{ref}), l'écart à la convention B est déterminé par $B = \frac{\frac{C_{éch}}{C_{ref}} - \frac{C_{conv}}{C_{ref}}}{\frac{C_{conv}}{C_{ref}}}$ |
| | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | Air calme | B = + 48,9% (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) C _{10M} /C _{conv} = 1,49 | |
| Sleeth <i>et al.</i> , 2012 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 0,1 | Détermination graphique. Sur-échantillonnage important 9,6 µm : E = 170%, B = 118% 13,9 µm : E = 110%, B = 53% 28,8 µm : E = 115%, B = 95% 37,7 µm : E = 90%, B = 63% 74 µm : E = 140%, B = 177% 89,5 µm : E = 125%, B = 149% ⇒ B = + 53 à +177 % (9,6 µm à 89,5 µm) | |
| | | 0,24 | Détermination graphique. Sur-échantillonnage 9,5 µm : E = 80%, B = 2% 12,8 µm : E = 100%, B = 37% 32,7 µm : E = 80%, B = 40% 44,3 µm : E = 65%, B = 21% 60,1 µm : E = 75%, B = 46% 62,4 µm : E = 100%, B = 95% ⇒ B = + 2% (9,5µm), +21 à + 95% (12,8 à 62,4 µm) | |
| | | 0,42 | Détermination graphique. Sur-échantillonnage à partir d'environ 40µm 9,3 µm : E = 68%, B = -14% 12,4 µm : E = 68%, B = -8% 28,7 µm : E = 75%, B = 27% 40 µm : E = 60%, B = 10% 63 µm : E = 75%, B = 47% | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------|---------------------------|-------------------------------|---|------------------------------|
| | | | 66,9 µm : E = 60%, B = 18% ⇒ B = -14% (9,3 µm), -8 % (12,4 µm), + 10 à + 47% (28,7 à 66,9 µm) | |

Annexe 2.3 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement de la CFC avec convention inhalable

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-------------------------------------|--|-------------------------------|---|------------------------------|
| Kenny, Aitken, <i>et al.</i> , 1997 | Orientation de l'entrée non précisée, mannequin en rotation | 1 | Détermination graphique. Sous-échantillonnage 7 µm : ND 8 µm : E = 70%, B = -14% 20 µm : E = 48%, B = -26% 21 µm : E = 58%, B = -10% 23,5 µm : E = 51%, B = -18% 31 µm : E = 22%, B = -62% 42 µm : E = 15%, B = -72% 55 µm : E = 20%, B = -61% 85 µm : E = 16%, B = -68% 100 µm : E = 17%, B = -66% ⇒ B = -14 à -72% (8 à 100 µm) | |
| Kenny, Aitken, <i>et al.</i> , 1997 | Orientation de l'entrée non précisée,, mannequin en rotation | 0,5 | Détermination graphique. Sous-échantillonnage 7 µm : E = 75%, B = -9% 8 µm : E = 65%, B = -20% 20 µm : E = 76%, B = 17% 21 µm : E = 70%, B = 9% 23,5 µm : E = 65%, B = 4% 31 µm : E = 49%, B = -15% 42 µm : E = 17%, B = -69% 55 µm : E = 10%, B = -81% 85 µm : E = 11%, B = -78% 100 µm : E = 4%, B = -92% ⇒B = -9 à -20% (7- 8 µm), +4 à +17% (20 – 23,5 µm), -15 à -92 % (31 – 100 µm) | |
| Kenny, Aitken, <i>et al.</i> , 1997 | Orientation de l'entrée non précisée, mannequin en rotation | 4 | Détermination graphique. 7 µm : E = 60%, B = -28% 20 µm : E = 41%, B = -37% 21 µm : E = 36%, B = -44% 23,5 µm : E = 35%, B = -44% 31 µm : E = 26%, B = -55% 42 µm : E = 15%, B = -72% 55 µm : E = 26%, B = -50% 85 µm : E = 30%, B = -40% 100 µm : E = 31%, B = -38% ⇒B = -28 à -72% (7- 100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> , 1999 | Entrée 45° vers le bas, mannequin en rotation | Très faible (non mesurable) | Echantillonneur isolé : 6 µm : E = 85,31%, B = 1% 26 µm : E = 27,69%, B = -54% 46 µm : E = 6,39%, B = -88% 58 µm : E = 1,02%, B = -98% B = +1% (6 µm), -54 à -98% (26 - 58 µm) échantillonneur plusieurs positions sur mannequin, résultat moyenne des positions. 6 µm : E = 89,8%, B = 6% 26 µm : E = 25,6%, B = -58% 58 µm : E = 4,5%, B = -91% 74 µm : E = 7,8%, B = -85% 90 µm : E = 19,3%, B = -62% | - |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-------------------------|---|-------------------------------|---|------------------------------|
| | | | B = +6% (6 µm), -58 à -91% (26 - 90 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée face au flux d'air (0°). Le positionnement de l'entrée de la cassette dans l'axe vertical n'est pas précisé | 0,55 | détermination graphique : Sur-échantillonnage jusqu'à env 30 µm. Augmentation des pertes sur parois à partir de 20 µm (80% à 40 µm). 2 µm : E = 100%, B = +6% 5 µm : E = 100%, B = + 15% 10 µm : E = 100%, B = + 29% ; 20 µm : E = 70%, B = + 8% 40 µm E = 35 à 45%, B = -17 à -35 % 68 µm : E = 27%, B = -47 % ⇒ B = +6 à +15 % (2 à 5µm), + 8 à + 29 % (10 – 20 µm), - 17 à - 47 % (40 – 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée perpendiculaire au flux d'air (90°). Le positionnement de l'entrée de la cassette dans l'axe vertical n'est pas précisé | 0,55 | détermination graphique : Sur-échantillonnage jusqu'à env 10µm. Pertes sur les parois 5 à 10% à 20µm, 5% à 40µm. 2µm : ND 5 µm : E = 95 à 100 %, B = + 9 à 15% 10 µm : E = 80 à 85%, B = + 3 à +10 % ; 20 µm : E = 20%, B = - 70 % 40 µm E = 5%, B = -91 % 68 µm : E = 10%, B = -80 % ⇒ B = + 3 à +15 % (2-5 µm), -70 à - 91 % (10 – 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée à l'opposé du flux d'air (180°). Le positionnement de l'entrée de la cassette dans l'axe vertical n'est pas précisé | 0,55 | détermination graphique : Sur-échantillonnage jusqu'à env 10 µm. Pertes sur les parois 10% à 40 µm 2 µm : ND 5 µm : E = 85 à 95 %, B = -2 à + 9 % 10 µm : E = 78 à 90 %, B = +1 à +16 % 20 µm : E = 35 à 40%, B = - 38 à -46% ; 40 µm : E = 10%, B = - 85 % 68 µm : E = 5%, B = -91 % ⇒ B = -2 à +16 % (2-10 µm), - 38 à - 91 % (20 – 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée face au flux d'air (0°). Le positionnement de l'entrée de la cassette dans l'axe vertical n'est pas précisé | 1 | détermination graphique : Sur-échantillonnage jusqu'à env 30 µm. Augmentation des pertes sur les parois à partir de 20 µm (80% à 40 µm). 2 µm : E = 96%, B = +2% 5 µm : E = 96 à 105%, B = + 10 à + 21% 10 µm : E = 92%, B = + 19% ; 20 µm : E = 90 à 92%, B = +38 à + 41% 40 µm E = 30 à 40%, B = -27 à -45 % 68 µm : E = 20%, B = - 60 % ⇒ B = + 2% (2µm), + 10 à + 41 % (5 – 20 µm), - 27 à - 60 % (40 – 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée perpendiculaire au flux d'air (90°). Le positionnement de l'entrée de la cassette dans l'axe vertical n'est pas précisé | 1 | Détermination graphique : Sur-échantillonnage jusqu'à env 5 µm. Pertes sur les parois 5 à 10% à 20 µm, 5% à 40 µm. 2 µm : E = 95%, B = + 9% 5 µm : E = 75 à 90 %, B = +3 à -14 % 10 µm : E = 62 à 65%, B = - 16 à -19% ; 20 µm : E = 15%, B = - 77 % 40 µm E = 5%, B = -91 % 68 µm : E = 0%, B = -100 % | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|---|--|-------------------------------|--|---|
| | | | ⇒ B = - 14 à +9 % (2-5 µm), -16 à - 100 % (10 – 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée à l'opposé du flux d'air (180°). Le positionnement de l'entrée de la cassette dans l'axe vertical n'est pas précisé | 1 | Détermination graphique : Sous-échantillonnage Pertes sur les parois 5% à 68 µm 2 µm : E = 90 à 95%, B = - 5 à +1 % 5 µm : E = 82 à 88 %, B = -6 à + 1 % 10 µm : E = 82 %, B = + 6 % 20 µm : E = 30%, B = - 54% ; 40 µm : E = 5%, B = - 91 % 68 µm : E = 5%, B = -90 % ⇒ B = - 5 à +6 % (2-10 µm), - 54 à -91% (20 – 68 µm) | |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000b | Entrée à 45° vers le bas Orientations 0°, 90°, 180° | 0,5 | 7 µm : E = 68%, B = -18% 29 µm : E = 18%, B = -69% 70 µm : E = 8%, B = -84% B = -18 à -84% (7, 29, 70 µm) | Lecture graphique, résultat = moyenne des orientations |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000b | Entrée à 45° vers le bas Orientations 0°, 90°, 180° | 2 | 7 µm : E = 64%, B = -23% 29 µm : E = 20%, B = -66% 70 µm : E = 25%, B = -51% B = -23 à -66% (7, 29, 70 µm) | Lecture graphique, résultat = moyenne des orientations |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000a | Entrée horizontale, toutes directions (0, 90, 180°) | 0,5 | Valeur moyennée selon les 3 directions (0, 90, 180°) Torse simplifié – Détermination graphique : 7 µm : E = 93%, B = + 12% 29 µm : E = 21%, B = -64% 70 µm : E = 2%, B = -96% Mannequin taille réelle – détermination graphique : 7 µm : E = 71%, B = -14% 29 µm : E = 20%, B = -66% 70 µm : E = 5%, B = -90% | |
| Witschger <i>et al.</i> 2004 | Entrée horizontale, face à la source | <0,1 | Efficacité décroît quand diamètre augmente Sous-échantillonnage 6,9 µm : E = 72%, B = -13% 14,1 µm : E = 20%, B = -72% (lecture graphique) 28,4 µm : E = 7 %, B = -88 % (lecture graphique) 38,7 µm : E = 2%, B = - 96% (lecture graphique) 60,1 µm : E = 1%, B = - 98% (lecture graphique) 76 µm : E = 1%, B = - 98 % (lecture graphique) Estimation pour 5, 10 et 15 µm : B = -21%, -39%, -54%. ⇒ B = -13 à -98% (5-76 µm) précision : RSD : 35% | |
| Görner <i>et al.</i> , 2010 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | Débit de prélèvement 1 L.min ⁻¹ B = -30,9 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) C _{cfc1} /C _{conv} = 0,69 Débit de prélèvement 2 L.min ⁻¹ B = -28 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) C _{cfc2} /C _{conv} = 0,72 | La publication mentionnant les rapports des concentrations massiques de particules (concentration de l'échantillonneur testé C _{éch} sur la concentration de la sonde de référence C _{ref} , ainsi que la concentration d'un préleveur « idéal » C _{conv} sur la concentration de la sonde de référence C _{ref}),, |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------------------------|--|-------------------------------|---|--|
| | | | | l'écart à la convention B est déterminé par $B = \frac{\frac{C_{éch}}{C_{ref}} - \frac{C_{conv}}{C_{ref}}}{\frac{C_{conv}}{C_{ref}}}$ |
| | CFC face au flux d'air mais entrée inclinée vers le bas (47°), mannequin statique Données de Buchan <i>et al.</i> , 1986, rapportées par Gömer <i>et al.</i> , 2010 | 1 | Débit à 2 L.min ⁻¹ : 2,4 µm : E = 68%, B = -27% (aérosol quasi monodispersé de fer) 9 µm : E = 61%, B = -23% (aérosol quasi monodispersé de tungstène) 24 µm : E = 8%, B = -87% (aérosol quasi monodispersé d'aluminium) | |
| | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | Air calme | Débit de prélèvement 1 L.min ⁻¹ B = -32,8 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) C _{cfc1} /C _{conv} = 0,67 Débit de prélèvement 2 L.min ⁻¹ B = -32 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) C _{cfc2} / C _{conv} = 0,68 | |
| | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | Air calme | Débit de prélèvement 1 L.min ⁻¹ Détermination graphique : 10 µm : E = 92%, B = 19% 20 µm : E = 78%, B = 21% 30 µm : E = 62%, B = 6% 40 µm : E = 49%, B = -11% 50 µm : E = 39%, B = -26% 60 µm : E = 28%, B = -46% ⇒ B = +6 à +21% (10 à 30 µm), -11 à -46% (40 à 60 µm) | |
| | Entrée inclinée vers le bas (45°), perpendiculaire au flux d'air (90°) | Air calme | Débit de prélèvement 1 L.min ⁻¹ Détermination graphique 10 µm : E = 73%, B = -6% 20 µm : E = 33%, B = -49% 30 µm : E = 8%, B = -86% 40 µm : E = 2%, B = -96% 50 µm : E = 2%, B = -96% 60 µm : E = 0%, B = -100% ⇒ B = -6 à -100 % (10 à 60 µm) | |
| Sleeth <i>et al.</i> , 2012 | Entrée inclinée vers le bas (45°), mannequin en rotation | 0,1 | Détermination graphique Sous-échantillonnage important à partir d'environ 20 µm 9,6 µm : E = 87,5%, B = 12% 13,9 µm : E = 44%, B = -39% 28,8 µm : E = 18%, B = -69% 37,7 µm : E = 13%, B = -76% 74 µm : E = 1%, B = -98% 89,5 µm : E = 1%, B = -98% ⇒ B = + 12% (9,6 µm), -39 à -98% (13,9 à 89,5 µm) | |
| | | 0,24 | Sous-échantillonnage important 9,5 µm : E = 45%, B = -43% 12,8 µm : E = 25%, B = -66% | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------|---------------------------|-------------------------------|--|------------------------------|
| | | | 32,7 µm : E = 12,5%, B = -78% 44,3 µm : E = 8%, B = -85% 60,1 µm : E = 6%, B = -88% 62,4 µm : E = 5%, B = -90% ⇒ B = - 43 à - 90% (9,5 à 62,4 µm) | |
| | | 0,42 | Sous-échantillonnage important 9,3 µm : E = 30%, B = -62% 12,4 µm : E = 25%, B = -66% 28,7 µm : E = 12,5%, B = -79% 40 µm : E = 7%, B = -87% 63 µm : E = 1%, B = -98% 66,9 µm : E = 2%, B = -96% ⇒ B = - 62 à - 98% (9,3 à 66,9 µm) | |

Annexe 2.4 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement de la CFC avec capsule interne

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------------------------|---|-------------------------------|--|--|
| Görner <i>et al.</i> , 2010 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | Débit de prélèvement 1 L.min ⁻¹ B = - 15,1 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) $C_{cfc1-capsule\ interne} / C_{conv} = 0,85$ | La publication mentionnant les rapports des concentrations massiques de particules (concentration de l'échantillonneur testé $C_{éch}$ sur la concentration de la sonde de référence C_{ref} , ainsi que la concentration d'un préleveur « idéal » C_{conv} sur la concentration de la sonde de référence C_{ref}), l'écart à la convention B est déterminé par $B = \frac{\frac{C_{éch}}{C_{ref}} - \frac{C_{conv}}{C_{ref}}}{\frac{C_{conv}}{C_{ref}}}$ |
| | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | Air calme | Débit de prélèvement 1 L.min ⁻¹ B = -1,6 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) $C_{cfc1-capsule\ interne} / C_{conv} = 0,98$ | |
| | | | Débit de prélèvement 1 L.min ⁻¹ B = + 5,7 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) $C_{cfc2-capsule\ interne} / C_{conv} = 1,06$ | |

Annexe 2.5 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du CIP-10 avec convention inhalable

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------------------------|---|-------------------------------|--|-------------------------------|
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | <p>Sous-échantillonnage</p> <p>7 µm : ND</p> <p>8 µm : E = 55%, B = -32%</p> <p>20 µm : E = 47%, B = -28%</p> <p>21 µm : E = 50%, B = -22%</p> <p>23,5 µm : E = 41%, B = -34%</p> <p>31 µm : E = 45%, B = -22%</p> <p>42 µm : E = 41%, B = -24%</p> <p>55 µm : E = 35%, B = -32%</p> <p>85 µm : E = 28%, B = -44%</p> <p>100 µm : E = 10%, B = -80%</p> <p>⇒ B = -22 à -80% (8 à 100 µm)</p> | Dispositif testé : CIP10-I-V1 |
| | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 0,5 | <p>Sous-échantillonnage à partir d'env. 20µm</p> <p>7 µm : E = 70%, B = -16%</p> <p>8 µm : E = 75%, B = -7%</p> <p>20 µm : E = 60%, B = -8%</p> <p>21 µm : E = 59%, B = -8%</p> <p>23,5 µm : E = 36%, B = -42%</p> <p>31 µm : E = 30%, B = -48%</p> <p>42 µm : E = 25%, B = -54%</p> <p>55 µm : E = 22%, B = -58%</p> <p>85 µm : E = 21%, B = -58%</p> <p>100 µm : E = 12%, B = -76%</p> <p>⇒ B = -7 à -16 % (7 – 21 µm), -42 à -76% (23,5 à 100 µm)</p> | |
| | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 4 | <p>Sur-échantillonnage important à partir d'env. 30 µm</p> <p>7 µm : E = 61%, B = -26%</p> <p>8 µm : ND</p> <p>20 µm : E = 42%, B = -35%</p> <p>21 µm : E = 41%, B = -36%</p> <p>23,5 µm : E = 50%, B = -20%</p> <p>31 µm : E = 80%, B = 38%</p> <p>42 µm : E = 92%, B = 70%</p> <p>55 µm : E = 110%, B = 112%</p> <p>85 µm : E = 118%, B = 135%</p> <p>100 µm : E = 120%, B = 139%</p> <p>⇒ B = -36 à -20% (7 – 23,5 µm), + 38 à + 139% (31 – 100 µm)</p> | Dispositif testé : CIP10-I-V1 |
| Görner <i>et al.</i> , 2009 | Entrée multidirectionnelle, mannequin en rotation | 1 | <p>Etablissement d'une carte de biais.</p> <p>MMAD 1 à 25 µm (pas de 1 µm) et GSD de 1,5 à 3,5 (pas de 0,25)</p> <p>BPC = 81%</p> <p>Biais compris entre 10 et 20% pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> - MMAD = 5 et GSD ≤ 2 - 6 ≤ MMAD < 12 et GSD ≤ 2,25 - 12 ≤ MMAD < 15 et GSD ≤ 2 - 15 ≤ MMAD < 18 et GSD ≤ 1,75 - 18 ≤ MMAD < 22 et GSD = 1,50 <p>Courbe efficacité et convention : comportement CIP 10 similaire à IOM (sur-échantillonnage jusqu'à environ 25 µm puis sous-</p> | Dispositif testé : CIP10-I-V2 |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------------------------|--|-------------------------------|--|--|
| | | | échantillonnagesous-échantillonnage jusqu'à environ 42 µm) | |
| Görner <i>et al.</i> , 2010 | Entrée multidirectionnelle, mannequin en rotation | 1 | CIP10-I-V1 : <ul style="list-style-type: none"> - B = - 27 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) - C_{CIP10-V1}/C_{conv} = 0,73 CIP10-I-V2 : <ul style="list-style-type: none"> - B = + 1,9 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) - C_{CIP10-V2}/C_{conv} = 1,02 | La publication mentionnant les rapports des concentrations massiques de particules (concentration de l'échantillonneur testé C _{éch} sur la concentration de la sonde de référence C _{ref} , ainsi que la concentration d'un préleveur « idéal » C _{conv} sur la concentration de la sonde de référence C _{ref}), l'écart à la convention B est déterminé par $B = \frac{\frac{C_{éch}}{C_{ref}} - \frac{C_{conv}}{C_{ref}}}{\frac{C_{conv}}{C_{ref}}}$ |
| | Entrée multidirectionnelle, positionnée vers le haut | Air calme | CIP10-I-V1 : <ul style="list-style-type: none"> - B = - 16 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) - C_{CIP10-V1}/C_{conv} = 0,84 CIP10-I-V2 : <ul style="list-style-type: none"> - B = - 22 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) - C_{CIP10-V2}/C_{conv} = 1,22 | |

Annexe 2.6 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du GSP (CIS) avec la convention inhalable

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|----------------------------|---|-------------------------------|--|------------------------------|
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | Détermination graphique Sous-échantillonnage à partir 20 µm 7 µm : ND 8 µm : E = 83%, B = 3% 20 µm : E = 65%, B = 0% 21 µm : E = 55%, B = -14% 23,5 µm : E = 39%, B = -37% 31 µm : E = 49%, B = -15% 42 µm : E = 21%, B = -61% 55 µm : E = 39%, B = -25% 85 µm : E = 29%, B = -42% 100 µm : E = 22%, B = -56% ⇒ B = 0 à +3% (8-20 µm), -14 à -61% (21 à 100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 0,4 | Détermination graphique Sous-échantillonnage à partir 40 µm 7 µm : E = 92%, B = 11% 8 µm : E = 87%, B = 7% 20 µm : E = 65%, B = 0% 21 µm : E = 69%, B = 8% 23,5 µm : E = 75%, B = 21% 31 µm : E = 58%, B = 0% 42 µm : E = 48%, B = -11% 55 µm : E = 23%, B = -56% 85 µm : E = 38%, B = -24% 100 µm : E = 23 %, B = -54% ⇒ B = 0 à +11% (7 à 21 µm), +21% (23,5 µm), 0% (31 µm), -11 à -56% (42 à 100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 4 | Détermination graphique Sous-échantillonnage 7 µm : E = 46%, B = -44% 8 µm : ND 20 µm : E = 15%, B = -77% 21 µm : E = 15%, B = -77% 23,5 µm : E = 10%, B = -84% 31 µm : E = 10%, B = -83% 42 µm : E = 8%, B = -85% 55 µm : E = 14%, B = -73% 85 µm : E = 20%, B = -60% 100 µm : E = 25 %, B = -50% ⇒ B = -44 à -85% (7 – 100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> , 1999 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | Très faible (non mesurable) | Echantillonneur isolé : 6 µm : E = 100,61%, B = 19% 18 µm : E = 97,12%, B = 45% 26 µm : E = 84,16%, B = 39% 34 µm : E = 79,95%, B = 42% 46 µm : E = 72,69%, B = 37% 58 µm : E = 51,85%, B = 1% 74 µm : E = 40,52%, B = -20% 90 µm : E = 33,22%, B = -34% | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-------------------------|---|-------------------------------|--|------------------------------|
| | | | B = +19 à +45% (6 à 46 µm), +1% (58 µm), -20 à -34 % (74 et 90 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 0,55 | Détermination graphique Pertes : insignifiantes jusqu'à 20 µm ; environ 30% à 40 µm, 50 à 65% à 68 µm Sur-échantillonnage jusqu'à environ 40 µm 2 µm : E = 100%, B = + 6% 5 µm : E = 98 à 100%, B = + 13 à +15 % 10 µm : E = 98%, B = + 27% ; 20 µm E = 90%, B = + 38% 40 µm E = 50 à 52%, B = -8 – 5% 68 µm : E = 15%, B = -70 % ⇒ B = +6 % (2 µm), +13 à +38 % (5 à 20 µm), -5 à -8% (40 µm), -70% (68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 0,55 | Détermination graphique Pertes : insignifiantes jusqu'à 10 µm et à 68 µm ; 15% à 20 µm, 10% à 40 µm, Sous-échantillonnage, à partir de 20 µm 2 µm : ND 5 µm : E = 78 à 90%, B = -10 à +3 % 10 µm : E = 75%, B = -3% 20 µm E = 45%, B = -31% 40 µm E = 5%, B = -91% 68 µm : E = 5%, B = -90 % ⇒ B = -10 à +3 % (5-10 µm), -31 à -91% (20 à 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, à l'opposé du flux d'air (180°) | 0,55 | Détermination graphique Pertes : toujours ≤ 10% (max à 40 µm) Sous-échantillonnage, à partir de 20 µm 2 µm : ND 5 µm : E = 90 à 100%, B = +3 à + 15% 10 µm : E = 80%, B = + 3% 20 µm E = 45%, B = -31% 40 µm E = 10%, B = -82% 68 µm : E = 8%, B = -84 % ⇒ B = +3 à +15% (5-10 µm), -31 à -84% (20 à 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 1 | Détermination graphique Pertes : insignifiantes jusqu'à 5 µm ; 10% à 10 µm, 15% à 20 µm, 30-55% à 40 µm, 55-70% à 68 µm Sous-échantillonnage à partir d'une taille comprise entre 40 et 68 µm 2 µm : E = 98% B = + 4% 5 µm : E = 98%, B = + 13 % 10 µm : E = 88 à 90%, B = +14 à + 16% ; 20 µm E = 80%, B = + 23% 40 µm E = 50 à 75%, B = -8 à +38% 68 µm : E = 30 à 49%, B = -4 à - 41 % ⇒ B = + 4% (2 µm), +13 à +38 % (5 à 40 µm), -4 à -41% (68 µm) | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-------------------------------------|---|-------------------------------|---|--|
| Li et al., 2000 | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 1 | Détermination graphique Pertes : insignifiantes. Max 10% à 20 µm Sous-échantillonnage 2 µm : E = 98, B = + 4% 5 µm : E = 80 à 85%, B = -2 à -8% 10 µm : E = 65%, B = - 16% 20 µm E = 8%, B = - 88% 40 µm E = 2%, B = -96% 68 µm : E = 0%, B = -100 % ⇒ B = -8 à +4% (5-10 µm), -16 à -100% (10 à 68 µm) | |
| | Entrée horizontale, à l'opposé du flux d'air (180°) | 1 | Détermination graphique Pertes : insignifiantes. Max 10% à 20 µm Sur-échantillonnage jusqu'à environ 10 µm 2 µm : E = 98%, B = + 4% 5 µm : E = 85 à 95%, B = -2 à +9% 10 µm : E = 77 à 82%, B = 0 à +6% 20 µm E = 12%, B = -82% 40 µm E = 2%, B = -96% 68 µm : E = 0%, B = -100 % ⇒ B = -2 à +9% (2 à 10 µm), -82 à -100% (20 à 68 µm) | |
| Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000b | Entrée horizontale Orientations 0°, 90°, 180° | 0,5 | 7 µm : E = 68%, B = -18% 29 µm : E = 55%, B = -6% 70 µm : E = 30%, B = -41% B = -6 à -41% (7, 29, 70 µm) | Lecture graphique, résultat = moyenne des orientations |
| Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000b | Entrée horizontale Orientations 0°, 90°, 180° | 2 | 7 µm : E = 48%, B = -42% 29 µm : E = 26%, B = -56% 70 µm : E = 34%, B = -33% B = -33 à -56% (7, 29, 70 µm) | Lecture graphique, résultat = moyenne des orientations |
| Aizenberg, Grinshpun, et al., 2000a | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 0,5 | 70 µm : E = +46,7% (3,2) , B = -8% (torse simplifié) | |
| | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 0,5 | 70 µm : E = +3,8% (3,2) , B = -93% (torse simplifié) | |
| | Entrée horizontale, opposée au flux d'air (180°) | 0,5 | 70 µm : E = +37,3% (6,0) , B = - 27% (torse simplifié) | |
| | Entrée horizontale, toutes directions | 0,5 | Valeur moyennée selon les 3 directions (0, 90, 180°) Torse simplifié – Détermination graphique (hormis pour 70 µm) : 7 µm : E = 91%, B = +10% 29 µm : E = 50%, B = -15% 70 µm : E = 22,9%, B = -55% Mannequin taille réelle – détermination graphique : 7 µm : E = 68%, B = -18% 29 µm : E = 52%, B = -12% | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|--------------------------------|--|-------------------------------|--|------------------------------|
| | | | 70 µm : E = 30%, B = -41% | |
| | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 2 | 70 µm : E = +85,9% (15) – B = +69% | |
| | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 2 | 70 µm : E = +6,3% (3,4) – B = - 88% | |
| | Entrée horizontale, opposée au flux d'air (180°) | 2 | 70 µm : E = +18,1% (5,5) – B = - 64% | |
| | Entrée horizontale, toutes directions | 2 | Valeur moyennée selon les 3 directions (0, 90, 180°) : 70 µm : E = 29,0%, B = -43% (torse simplifié) | |
| Aizenberg <i>et al.</i> , 2001 | Entrée horizontale 0° : face au flux d'air 90°, 270° : perpendiculaire au flux d'air 180° : opposée au flux d'air | 1 | Efficacité moyennée selon les orientations – Biais déterminé graphiquement 65 µm : E = env. 30%, B = -41% 100 µm : E = 49%, B = -2% 160 µm, E = 20% 240 µm, E = 35% | |
| Aizenberg <i>et al.</i> , 2001 | Entrée horizontale 0° : face au flux d'air 90°, 270° : perpendiculaire au flux d'air 180° : opposée au flux d'air | 0,5 | Efficacité moyennée selon les orientations – Biais déterminé graphiquement 65 µm : E = 18%, B = -65% 100 µm : E = 20%, B = -60% 160 µm, E = 25% 240 µm, E = 40% | |
| Sleeth <i>et al.</i> , 2012 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 0,1 | Détermination graphique Sur-échantillonnage important 9,6 µm : E = 190%, B = 143% 13,9 µm : E = 110%, B = 53% 28,8 µm : E = 105%, B = 78% 37,7 µm : E = 87%, B = 58% 74 µm : E = 105%, B = 108% 89,5 µm : E = 80%, B = 59% ⇒ B = +53 à +143% (9,6 à 89,5 µm) | |
| | | 0,24 | Détermination graphique Sur-échantillonnage 9,5 µm : E = 105%, B = 34% 12,8 µm : E = 80%, B = 9% 32,7 µm : E = 78%, B = 37% 44,3 µm : E = 50%, B = -7% 60,1 µm : E = 70%, B = 36% 62,4 µm : E = 40%, B = -22% | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------|---------------------------|-------------------------------|--|------------------------------|
| | | | ⇒ B = +34% (9,5 µm), + 9% (12,8 µm), +37% (32,7 µm), -7% (44,3 µm), +36% (60,1µm), -22% (62,4 µm) | |
| | | 0,42 | Détermination graphique Sous-échantillonnage 9,3 µm : E = 75%, B = -5% 12,4 µm : E = 70%, B = -5% 28,7 µm : E = 55%, B = -7% 40 µm : E = 40%, B = -27% 63 µm : E = 40%, B = -22% 66,9 µm : E = 45%, B = -12% ⇒ B = -5 à -7% (9,3 à 28,7 µm), -12 à -27% (40 à 66,9 µm) | |

Annexe 2.7 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du Button avec la convention inhalable

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-------------------------|---|-------------------------------|---|------------------------------|
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 0,55 | Détermination graphique. Pertes 0% pour 2, 5, 10 et 20 µm, 10% à 40 µm, 15% à 68 µm Sur-échantillonnage 2 µm : E = 100%, B = + 6% 5 µm : E = 95%, B = + 9% 10 µm : E = 95 à 100%, B = + 23 à + 29% 20 µm E = 65 à 85%, B = 0 à +31% 40 µm E = 120 à 140%, B = +120 à +160% 68 µm : E = 90 à 125%, B = +77 à + 146 % ⇒ B = +6 à + 9% (2-5 µm), +23 à +160% (10 à 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 0,55 | Détermination graphique Pertes : négligeables Sous-échantillonnage 2 µm : ND 5 µm : E = 80%, B = -8% 10 µm : E = 60%, B = - 22% 20 µm E = 30%, B = - 54% 40 µm E = 20%, B = - 63% 68 µm : E = 15%, B = - 70 % ⇒ B = - 8% (5 µm), -22 à -70% (10 à 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, à l'opposé du flux d'air (180°) | 0,55 | Détermination graphique Pertes : négligeables Sous-échantillonnage 2 µm : ND 5 µm : E = 80%, B = -8% 10 µm : E = 82%, B = +6% 20 µm : E = 20%, B = - 69% 40 µm : E = 10%, B = - 82% 68 µm : E = 0%, B = - 100% ⇒ B = -8 à +6 % (5-10 µm), -69 à -100 % (20 à 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 1 | Détermination graphique Pertes : 0% pour 2, 5, 10 µm, 5% à 20 µm, 10 à 20% à 40 µm, 30 à 40% à 68 µm Sur-échantillonnage 2 µm : E = 100%, B = + 6% 5 µm : E = 80 – 90%, B = -8 à +3% 10 µm : E = 90 à 98%, B = + 16 à +27% 20 µm E = 120 à 130%, B = + 84 à +100% 40 µm E = 170 à 180%, B = +212 à + 230% 68 µm : E = 135 à 150%, B = +156 à 195% ⇒ B = -8 à +6 % (2-5 µm), +16 à +230% (10 à 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 1 | Détermination graphique Pertes négligeables Sous-échantillonnage 2 µm : ND | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|---|--|-------------------------------|--|--|
| | | | 5 µm : E = 58 à 70%, B = - 20 à -33% 10 µm : E = 50%, B = -35% 20 µm : E = 30%, B = - 54% 40 µm : E = 20 à 30%, B = - 63 à -45% 68 µm : E = 10%, B = - 80 % ⇒ B = -20 à -80% (5 à 68 µm) | |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, à l'opposé du flux d'air (180°) | 1 | Détermination graphique : Pertes négligeables Sous-échantillonnage 2 µm : ND 5 µm : E = 90 à 100%, B = +3 à + 15% 10 µm : E = 70%, B = -10% 20 µm : E = 30%, B = - 54% 40 µm : E = 0%, B = - 100% 68 µm : E = 0%, B = - 100% ⇒ B = -10 à +15% (5 – 10 µm), -54 à -100% (20 à 68 µm) | |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000b | Entrée horizontale Orientations 0°, 90°, 180° | 0,5 | 7 µm : E = 68%, B = -18% 29 µm : E = 40%, B = -32% 70 µm : E = 44%, B = -13% B = -13 à -18% (7, 29, 70 µm) | Lecture graphique, résultat = moyenne des orientations |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000b | Entrée horizontale Orientations 0°, 90°, 180° | 2 | 7 µm : E = 64%, B = -23% 29 µm : E = 35%, B = -40% 70 µm : E = 37%, B = -27% B = -23 à -40% (7, 29, 70 µm) | Lecture graphique, résultat = moyenne des orientations |
| Aizenberg, Grinshpun, <i>et al.</i> , 2000b | Entrée horizontale, toutes directions (0, 90, 180°) | 0,5 | Valeur moyennée selon les 3 directions (0, 90, 180°) Torse simplifié – Détermination graphique : 7 µm : E = 83%, B = 0% 29 µm : E = 39%, B = -34% 70 µm : E = 35%, B = -31% Mannequin taille réelle – détermination graphique : 7 µm : E = 66%, B = -20% 29 µm : E = 40%, B = -32% 70 µm : E = 42%, B = -17% | |
| Aizenberg <i>et al.</i> , 2001 | Entrée horizontale 0° : face au flux d'air 90°, 270° : perpendiculaire au flux d'air 180° : opposée au flux d'air | 1 | Efficacité moyennée selon les orientations – Biais déterminé graphiquement 65 µm : E = env. 30%, B = -41% 100 µm : E = 45%, B = -10% 160 µm, E = 35% 240 µm, E = 35% | |
| Aizenberg <i>et al.</i> , 2001 | Entrée horizontale 0° : face au flux d'air 90°, 270° : perpendiculaire au flux d'air 180° : opposée au flux d'air | 0,5 | Efficacité moyennée selon les orientations – Biais déterminé graphiquement 65 µm : E = 20%, B = -61% 100 µm : E = 30%, B = -40% 160 µm, E = 25% 240 µm, E = 45% | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|------------------------------|---|-------------------------------|--|---|
| Witschger <i>et al.</i> 2004 | Entrée horizontale, face à la source | < 0,1 | MMAD 5-15 µm : +13 à +26% écart à la convention estimé : 6,9 µm: B = +19% 76 µm : B = +17% lecture graphique : 38,7 : E env 80%, B = +46% ⇒ B = +13 à +26% (5-15 µm), +46% (38,7 µm), +17% (76 µm) précision : RSD : 11% | |
| Görner <i>et al.</i> , 2010 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | B = -17,6 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) C _{Button} /C _{conv} = 0,82 | La publication mentionnant les rapports des concentrations massiques de particules (concentration de l'échantillonneur testé C _{éch} sur la concentration de la sonde de référence C _{ref} , ainsi que la concentration d'un préleveur « idéal » C _{conv} sur la concentration de la sonde de référence C _{ref}), l'écart à la convention B est déterminé par $B = \frac{\frac{C_{éch}}{C_{ref}} - \frac{C_{conv}}{C_{ref}}}{\frac{C_{conv}}{C_{ref}}}$ |
| | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | Air calme | B = + 26,5 % (MMAD = 24 µm, GSD = 1,4 (qqes µm à 70 µm)) C _{Button} /C _{conv} = 1,27 | |
| Sleeth <i>et al.</i> , 2012 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 0,1 | Détermination graphique Sur-échantillonnage 9,6 µm : E = 230%, B = 194% 13,9 µm : E = 100%, B = 39% 28,8 µm : E = 85%, B = 44% 37,7 µm : E = 70%, B = 27% 74 µm : E = 150%, B = 197% 89,5 µm : E = 120%, B = 139% ⇒ B = + 27 à +197% (9,6 à 89,5 µm) | |
| | | 0,24 | Détermination graphique Sur-échantillonnage à partir d'environ 55 µm 9,5 µm : E = 95%, B = 21% 12,8 µm : E = 75%, B = 2% 32,7 µm : E = 63%, B = 10% 44,3 µm : E = 50%, B = -7% 60,1 µm : E = 100%, B = 95% 62,4 µm : E = 75%, B = 47% ⇒ B = +21 % (9,5 µm), -7 à + 10% (12,8 à 44,3 µm), + 47 à + 95% (60,1 – 62,4 µm) | |
| | | 0,42 | Détermination graphique Sur-échantillonnage à partir d'environ 60 µm 9,3 µm : E = 70%, B = -11% 12,4 µm : E = 55%, B = -25% | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------|---------------------------|-------------------------------|---|------------------------------|
| | | | 28,7 µm : E = 50%, B = -15% 40 µm : E = 45%, B = -17% 63 µm : E = 63%, B = 23% 66,9 µm : E = 70%, B = 38% ⇒ B = -11 à -25% (9,3 à 40 µm), +23 à +38% (63 – 66,9 µm) | |

Annexe 2.8 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du 7-hole avec la convention inhalable

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|----------------------------|---|-------------------------------|--|------------------------------|
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | Détermination graphique : Sous-échantillonnage 7 µm : ND 8 µm : E = 65%, B = -20% 20 µm : E = 45%, B = -31% 21 µm : E = 46%, B = -28% 23,5 µm : E = 40%, B = -36% 31 µm : E = 26%, B = -55% 42 µm : E = 17%, B = -69% 55 µm : E = 20%, B = -61% 85 µm : E = 17%, B = -66% 100 µm : E = 30%, B = -40% ⇒ B = -20 à -69% (8 à 100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 0,5 | Détermination graphique : Sous-échantillonnage 7 µm : E = 72%, B = -13% 8 µm : E = 78%, B = -4% 20 µm : E = 82%, B = 26% 21 µm : E = 80%, B = 25% 23,5 µm : E = 61%, B = -2% 31 µm : E = 55%, B = -5% 42 µm : E = 35%, B = -35% 55 µm : E = 33%, B = -36% 85 µm : E = 54%, B = 7% 100 µm : E = 36%, B = -28% ⇒ B = -13% (7 µm), -4% (8 µm), +26% (20 µm), -2 à -5% (23,5-31 µm), -35% (42-55 µm), +7% (85 µm), -28% (100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 4 | Détermination graphique : Sous-échantillonnage jusqu'à environ 70 µm 7 µm : E = 53%, B = -36% 8 µm : E = %, B = -100% 20 µm : E = 22%, B = -66% 21 µm : E = 20%, B = -69% 23,5 µm : E = 21%, B = -66% 31 µm : E = 18%, B = -69% 42 µm : E = 16%, B = -70% 55 µm : E = 32%, B = -38% 85 µm : E = 57%, B = 13% 100 µm : E = 70%, B = 40% ⇒ B = -36 à -100 % (7 – 55 µm), +13 à +40% (85-100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> , 1999 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | Très faible (non mesurable) | échantillonneur plusieurs positions sur mannequin, résultat = moyenne des positions : 6 µm : E = 94,6%, B = 11% 26 µm : E = 93,7%, B = 55% 58 µm : E = 83,5%, B = 62% 74 µm : E = 37,9%, B = -25% 90 µm : E = 37,3%, B = -26% B = +11 à +62% (6 - 58 µm), -25% (74 et 90 µm) | - |
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 0,55 | Détermination graphique Pertes négligeables jusqu'à 40µm, puis 30 à 95% pour 68 µm. | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------------|---|-------------------------------|---|------------------------------|
| | | | Sur-échantillonnage 2 µm : E = 100%, B = + 6% 5 µm : E = 100%, B = + 15% 10 µm : E = 100%, B = + 29% 20 µm : E = 100%, B = + 54% 40 µm : E = 85 à 110 %, B = + 55 à +102 % 68 µm : E = 65%, B = + 28% ⇒ B = +6% (2 µm), +15 à +102% (5 à 68 µm) | |
| Li et al., 2000 | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 0,55 | Détermination graphique Pertes négligeables Sur-échantillonnage, puis sous-échantillonnage sous-échantillonnage à partir de 10 µm 2 µm : ND 5 µm : E = 90% , B = + 3% 10 µm : E = 75%, B = - 3% 20 µm : E = 25 à 35%, B = -46 à - 60% 40 µm : E = 5%, B = - 90 % 68 µm : E = 0%, B = -100 % ⇒ B = -3 à +3% (5-10 µm), -46 à -100% (20 à 68 µm) | |
| Li et al., 2000 | Entrée horizontale, à l'opposé du flux d'air (180°) | 0,55 | Détermination graphique Pertes négligeables Sur-échantillonnage, puis sous-échantillonnage sous-échantillonnage entre 10 et 20 µm 2 µm : ND 5 µm : E = 100% , B = + 15% 10 µm : E = 95 à 100%, B = + 23 à +29 % 20 µm : E = 50%, B = - 23% 40 µm : E = 25%, B = - 54 % 68 µm : E = 5%, B = -90 % ⇒ B = +15 à +29 % (5-10 µm), -23 à -90% (20 à 68 µm) | |
| Li et al., 2000 | Entrée horizontale, face au flux d'air (0°) | 1 | Détermination graphique Pertes négligeables jusqu'à 20 µm, environ 20% à 40 µm puis 60 à 95% pour 68 µm Sur-échantillonnage 2 µm : E = 100%, B = + 6% 5 µm : E = 100% , B = + 15% 10 µm : E = 105%, B = + 36% 20 µm : E = 135%, B = + 107% 40 µm : E = 170 à 190 %, B = + 210 à + 250 % 68 µm : E = 160 à 250 %, B = + 210 à + 390% ⇒ B = +6% (2 µm), +15 à +390% (5 à 68 µm) | |
| Li et al., 2000 | Entrée horizontale, perpendiculaire au flux d'air (90°) | 1 | Détermination graphique Pertes négligeables Sur-échantillonnage, puis sous-échantillonnage sous-échantillonnage à partir de 10 µm 2 µm : ND 5 µm : E = 90% , B = + 3% 10 µm : E = 75%, B = - 3% 20 µm : E = 10 à 15%, B = -77 à -85 % 40 µm : E = 5%, B = - 90 % 68 µm : E = 0%, B = -100 % ⇒ B = -3 à +3% (5-10 µm), - 77 à -100% (20 à 68 µm) | |
| Li et al., 2000 | Entrée horizontale, à l'opposé du flux d'air (180°) | 1 | Détermination graphique Pertes négligeables Sur-échantillonnage, puis sous-échantillonnage entre 10 et 20 µm 2 µm : ND | |

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------|---------------------------|-------------------------------|--|------------------------------|
| | | | 5 µm : E = 105% , B = + 21% 10 µm : E = 90%, B = + 16 % 20 µm : E = 50%, B = - 23% 40 µm : E = 10%, B = - 82% 68 µm : E = 0%, B = -100 % ⇒ B = +16 à +21% (5-10 µm), -23 à -100% (20 à 68 µm) | |

Annexe 2.9 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du PAS 6 avec la convention inhalable

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|--------------------------|--|-------------------------------|--|------------------------------|
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | détermination graphique : Sous-échantillonnage 7 µm : ND 8 µm : E = 58%, B = -28% 20 µm : E = 48%, B = -26% 21 µm : E = 40%, B = -25% 23,5 µm : E = 28%, B = -36% 31 µm : E = 21%, B = -52% 42 µm : E = 31%, B = -61% 55 µm : E = 62%, B = -40% 85 µm : E = 43%, B = 23% 100 µm : E = %, B = -14% ⇒ B = -14 à -61 % (7 – 100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 0,5 | détermination graphique : 7 µm : E = 63%, B = -24% 8 µm : E = 87%, B = 7% 20 µm : E = 71%, B = 23% 21 µm : E = 71%, B = 11% 23,5 µm : E = 59%, B = 14% 31 µm : E = 47%, B = 2% 42 µm : E = 22%, B = -13% 55 µm : E = 15%, B = -58% 85 µm : E = 20%, B = -70% 100 µm : E = %, B = -60% ⇒ B = -24 % (7 µm), +2 à +14 % (8 – 31 µm), -13 à -70% (42 – 100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 4 | détermination graphique : sous-échantillonnage jusqu'à environ 70 µm 7 µm : E = 44%, B = -47% 8 µm : ND 20 µm : E = 30%, B = -52% 21 µm : E = 26%, B = -53% 23,5 µm : E = 29%, B = -58% 31 µm : E = 21%, B = -50% 42 µm : E = 31%, B = -61% 55 µm : E = 64%, B = -40% 85 µm : E = 45%, B = +27% 100 µm : E = %, B = -10% ⇒ B = -40 à -61 % (7 – 55 µm), -10 à +27% (85-100 µm) | |

Annexe 2.10 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du Perspec avec la convention inhalable

| Référence | Orientation du dispositif | Vit. Air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|--------------------------|---|-------------------------------|--|------------------------------|
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 1 | détermination graphique : Sous-échantillonnage 7 µm : ND 8 µm : E = 62%, B = -23% 20 µm : E = 32%, B = -51% 21 µm : E = 40%, B = -38% 23,5 µm : E = 20%, B = -68% 31 µm : E = 15%, B = -74% 42 µm : E = 13%, B = -76% 55 µm : E = 22%, B = -58% 85 µm : E = 22%, B = -56% 100 µm : E = 24%, B = -52% ⇒ B = -23 à -76% (8 à 100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 0,5 | Détermination Graphique Sur-échantillonnage 7 µm : E = 75%, B = -9% 8 µm : E = 82%, B = 1% 20 µm : E = 85%, B = 31% 21 µm : E = 85%, B = 32% 23,5 µm : E = 75%, B = 21% 31 µm : E = 73%, B = 26% 42 µm : E = 56%, B = 4% 55 µm : E = 52%, B = 0% 85 µm : E = 71%, B = 41% 100 µm : E = 80%, B = 60% B = -9 à +1% (7-8 µm), +21 à +32% (20 à 31 µm), 0 à +4% (42-55 µm), +41 à +60% (85-100 µm) | |
| Kenny <i>et al.</i> 1997 | Entrée horizontale, mannequin en rotation | 4 | détermination graphique : Sous-échantillonnage 7 µm : E = 44%, B = -47% 8 µm : ND 20 µm : E = 20%, B = -69% 21 µm : E = 15%, B = -77% 23,5 µm : E = 17%, B = -73% 31 µm : E = 11%, B = -81% 42 µm : E = 10%, B = -81% 55 µm : E = 26%, B = -50% 85 µm : E = 30%, B = -40% 100 µm : E = 44%, B = -12% ⇒ B = -12 à -81% (8 à 100 µm) | |

Annexe 2.11 : Autres études comparant les mesures réalisées avec différents dispositifs de la fraction inhalable

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires |
|-------------------------------|---|---------------------------------|---|--|
| Kalatoor <i>et al.</i> , 1995 | Mise au point d'un prototype de préleveur | Button (prototype) CFC-25 mm | Prototype Button : - Orientation : face au flux - 17 µm : E = 52%, B = -24% - 26 µm : E = 47%, B = -22% - 38 µm : E = 20%, B = -64% - Orientation : vers le bas (90°) : - 17 µm : E = 31%, B = -54% - 26 µm : E = 34%, B = -44% - 38 µm : E = 7%, B = -87% CFC-25 mm : - Orientation : face au flux - 17 µm : E = 55% à 125% (détermination graphique) B = -19 à +84% - 26 µm : E = 55 à 130% (détermination graphique), B = -9 à +115% - 38 µm : E = 15 à 30%, B = -73 à -46 % - Orientation : vers le bas (90°) : - 17 µm : E = 13 à 55%, B = -81 à -19% - 26 µm : E = 13 à 50%, B = -79 à -17% - 38 µm : E = 0%, B = -100 % | Efficacité E donnée par article, B écart à la convention estimé par Anses |
| Werner <i>et al.</i> 1996 | revue des facteurs de conversion IOM/CFC | IOM CFC | Industrie borates : - C_{iom}/C_{cfc} (masse) = 2,20 (N = 58, MCO) Industrie du Ni : - C_{iom}/C_{cfc} (Ni) = 1,65 à 3,2 (N = 21 à 46, MCP) Industrie du Pb : - C_{iom}/C_{cfc} (Pb) = 1,77 (N = 151, MCP) - C_{iom}/C_{cfc} (Cd) = 1,76 (N = 54, MCP) Atelier mécanique : - C_{iom}/C_{cfc} (fluide coupe) = 2,96 (N = 23, MCP) Industrie du bois : - C_{iom}/C_{cfc} (masse) = 1,79 (N = 10, ratio des médianes) Atelier de réparation : - C_{iom}/C_{cfc} (masse) = 0,95 (N = 15, ratio des médianes) - C_{iom}/C_{cfc} (Al) = 1,36 (N = 15, ratio des médianes) Industrie batterie au Pb : - C_{iom}/C_{cfc} (masse) = 2,36 (N = 11, ratio des médianes) - C_{iom}/C_{cfc} (Al) = 1,29 (N = 11, ratio des médianes) Industrie fonderie Aluminium : | MCO : régression méthode des moindres carrés ordinaires MCP : régression méthode des moindres carrés pondérés |

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|
| | | | C_{iom}/C_{cfc} (masse) = 3,57 (N = 36, ratio des médianes) | |
| Tsai <i>et al.</i> 1995 | Comparaison dispositifs | IOM CFC | C_{iom}/C_{cfc} (masse) : toujours > 1, variable selon les postes de travail, de $1,4 \pm 2,21$ à $4,9 \pm 4,06$ C_{iom}/C_{cfc} (Ni) : toujours > 1, variable selon les postes de travail, de $1,16 \pm 0,34$ à $2,84 \pm 1,68$ Coefficients de corrélation R^2 allant de 0,70 à 1 | C_{iom} = concentration mesurée par IOM (mg.m ⁻³) C_{cfc} = concentration mesurée par CFC (mg.m ⁻³) |
| Tatum <i>et al.</i> 2001 | Comparaison interdispositifs | IOM CFC 7-hole CIS | <p><u>Essai 1 :</u> C_{iom} = 0,18 à 5,40 (14,4 à 52,8%) C_{cfc} = 0,13 à 2,50 (2,8 à 20%) C_{7-hole} = 0,11 à 3,12 (11,6 à 40,6 %) C_{cis} = 0,31 à 5,30 (1,9 à 29,7%)</p> <p><u>Essai 2 :</u> C_{iom} = 0,11 à 9,74 (5,6 à 23,9%) C_{cfc} = 0,09 à 5,06 (4,34 à 35%) C_{7-hole} = 0,07 à 7,08 (4,8 à 42,9%) C_{cis} = 0,11 à 8,5 (0 à 20,3%)</p> <p>C_{iom}/C_{cfc} = 1,58 (1,1-2,5, 6, 34)</p> <p><u>Essai 3 :</u> C_{iom} = 0,2 à 3,8 C_{iom}/C_{cfc} = 1,94 (0,6-3,7, 17, 45)</p> <p><u>ratio moyen essai 2+3 :</u> C_{iom}/C_{cfc} = 1,85 (0,6-3,7, 23, 43)</p> <p>Corrélation ratio avec MMD : $r=0,27$, $r^2 = 0,07$</p> | <p>C = Concentration moyenne en mg.m⁻³ (CV en %)</p> <p>ratio = $C_{dispositif}/C_{cfc}$: moyenne (min-max, N, CV%)</p> <p>Essais de fidélité</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ CFC plus fidèle, puis CIS, 7-hole et IOM ⇒ Variabilité plus importante observée sur site avec émissions de particules plus larges ⇒ Autres études : variabilité plus grande de IOM et CIS – hypothèse avancée ouverture plus grande induit pénétration particules plus grandes (Vaughan <i>et al.</i> 1990, Davies <i>et al.</i> 1999) <p>Comparaison différents dispositifs avec CFC (ratio $C_{dispositif}/C_{cfc}$) :</p> <p>Ratio moyens :</p> <p>C_{iom}/C_{cfc} = 1,58 (43%) C_{7-hole}/C_{cfc} = 1,34 (34%) C_{cis}/C_{cfc} = 1,46 (27%)</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Grande variabilité des ratios, plus important avec l'IOM ⇒ Hypothèses avancées : large ouverture de l'IOM et du CIS implique pénétration particules de plus grande taille et plus grande variabilité des concentrations mesurées <p>Ratios dépendent des caractéristiques des particules collectées</p> |

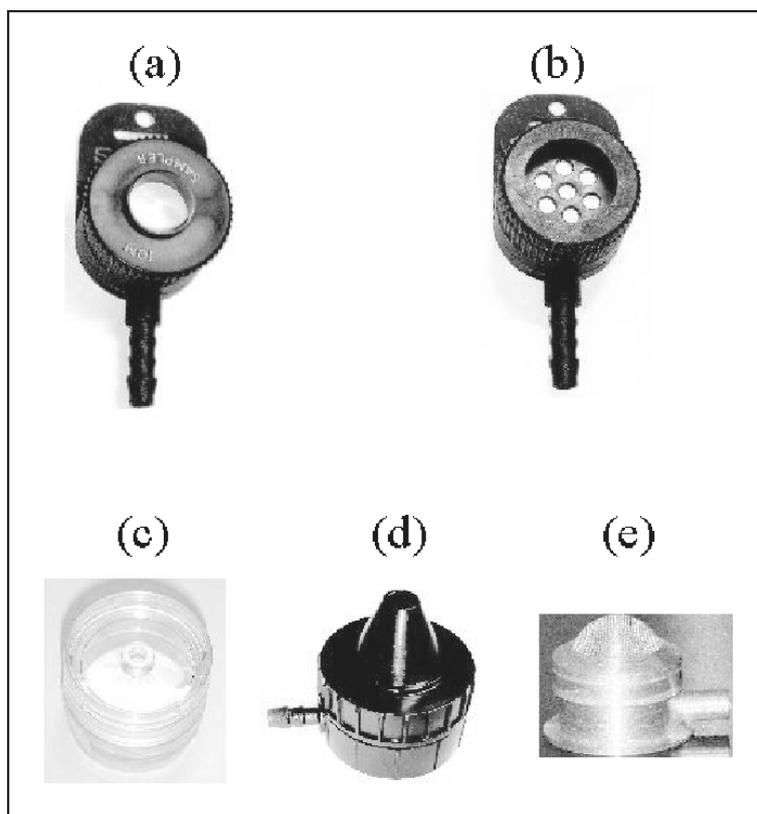
| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires |
|------------------------------|---|----------------------|--|--|
| | | | | (notamment distribution granulométrique). |
| Demange <i>et al.</i> , 2002 | Comparaison IOM et CFC Masse particules prélevées et éléments métalliques prélevés | IOM CFC | <p>Variation intra-échantillonneur :</p> <p>IOM = 50%</p> <p>CFC₁ = 33%</p> <p>CFC₂ = 34%</p> <p>Variation moins importante lorsque éléments métalliques analysés sur filtre (CFC₁ : 24%, CFC₂ : 28%, IOM : 14%) et diminue également lorsque les dépôts sur les parois sont pris en compte pour l'analyse des composés métalliques : CFC : 12 à 21%</p> <p>Ratio C_{IOM}/C_{CFC} moyen de 1,27 à 1,82, avec coefficient de variation allant de 39 à 64%.</p> <p>Ce ratio diminue si la comparaison porte sur les éléments métalliques analysés : 1,16 à 1,39 (17 à 28%), et est encore plus faible lorsque les dépôts sur les parois de la CFC sont pris en compte pour l'analyse des composés métalliques : 0,96 à 1,09 (11 à 20%) :</p> <p>C_{CFC2}/C_{CFC1} (masse, filtre) = 1,15 (1,27 ; 0,82 ; 41)</p> <p>C_{CFC2}/C_{CFC1} (métaux, filtre) = 1,14 (1,16 ; 0,33 ; 46)</p> <p>C_{CFC2}/C_{CFC1} (métaux, filtre + parois) = 0,97 (0,96 ; 0,15 ; 45)</p> | <p>C_{IOM} = concentration déterminée avec l'IOM en mg.m⁻³.</p> <p>C_{CFC1} = concentration déterminée avec la CFC à 1 L.min⁻¹ en mg.m⁻³</p> <p>C_{CFC2} = concentration déterminée avec la CFC à 2 L.min⁻¹ en mg.m⁻³</p> <p>Présentation des résultats :</p> <p>C_{IOM}/C_{CFC} = médiane (moyenne ; écart-type ; N)</p> |
| Harper et Muller, 2002 | Comparaison interdispositifs | IOM CFC Button | <p>Différences statistiquement significatives :</p> <ul style="list-style-type: none"> - C_{IOM}/C_{CFC} : <ul style="list-style-type: none"> o (p<0,0005, n=16) : o C_{IOM} = 1,4 à 154 mg.m⁻³ o - C_{CFC} = 0,48 à 26 mg.m⁻³ o Différence relative : 1,1 à 19 (médiane 3,5) o différences les plus importantes observées au cours des tâches produisant de larges particules couvrant les opérateurs o Ratios les plus élevés observés pour les concentrations les plus élevées » - C_{IOM}/C_{Button} : <ul style="list-style-type: none"> o (p<0,02, n=12) o C_{IOM} = 0,34 à 237 mg.m⁻³ o - C_{Button} = 0,69 à 14 mg.m⁻³ | <p>Différence relative :</p> $\frac{C_A - C_B}{\sqrt{Variance_A + Variance_B}}$ |

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------|---|------------------------------------|
| | | | <ul style="list-style-type: none"> ○ Différence relative : 0,49-163 (médiane 3,15) ○ différences les plus importantes observées au cours des tâches produisant de larges particules couvrant les opérateurs ○ Ratios les plus élevés observés pour les concentrations les plus élevées » <p>Différences non statistiquement significatives :</p> <ul style="list-style-type: none"> - C_{CFC}/C_{Button} <ul style="list-style-type: none"> ○ ($p < 0,098$, $n=23$) ○ $C_{CFC} = 0,55$ à 13 mg.m^{-3} - $C_{Button} = 0,37$ à $5,7 \text{ mg.m}^{-3}$ ○ Différence relative : 0,36-27 (médiane 1,2) ○ différences les plus importantes observées au cours des tâches produisant de larges particules couvrant les opérateurs ○ Ratios les plus élevés observés pour les concentrations les plus élevées | |
| Harper, Muller, <i>et al.</i> , 2002 | Comparaison interdispositifs | IOM CFC Button | <p>Aucune particule de $Dae > 100 \mu\text{m}$ retrouvée dans 15 échantillons sur 19.</p> <p>Echantillons contenant des particules $> 100 \mu\text{m}$ prélevés par IOM et CFC.</p> <p>Echantillons prélevés avec Button : aucune particule de $D > 100 \mu\text{m}$ retrouvée.</p> <p>Lorsque des particules de tailles $> 100 \mu\text{m}$ ont été retrouvées : ces particules comptent pour 40 à 90% de la masse totale</p> | |
| Kerr <i>et al.</i> 2002 | Comparaison interdispositifs | IOM CFC GSP | <p>C_{IOM}/C_{CFC} (production) = 2,90 (IC = 2,34-3,47)</p> <p>C_{IOM}/C_{CFC} (packing) = 3,27 (IC=2,96-3,57)</p> <p>C_{IOM}/C_{CFC} (total) = 2,97 (2,73-3,22)</p> <p>C_{GSP}/C_{CFC} (production) = 2,88 (IC =2,53-3,23)</p> <p>C_{GSP}/C_{CFC} (packing) = 2,61 (IC=1,61-3,60)</p> <p>C_{GSP}/C_{CFC} (total) = 2,87 (2,59-3,14)</p> <p>Pente Sampler / IOM (régression linéaire)</p> <p>C_{GSP}/C_{IOM} (production) = 1,02 (IC=0,69-1,35)</p> <p>C_{GSP}/C_{IOM} (packing) = 0,92 (IC=0,79-1,06)</p> | IC = intervalle de confiance à 95% |

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires |
|--------------------------------|---|------------------------------------|--|---|
| | | | $C_{GSP}/C_{IOM} \text{ (total)} = 0,92 \text{ (IC=0,81-1,03)}$ | |
| Calzavara <i>et al.</i> , 2003 | Comparaison interdispositifs | IOM CFC | <p>Mesures individuelles (N = 58) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - aérosol : <ul style="list-style-type: none"> ▪ $C_{IOM} = 2,47 \pm 2,51 \text{ mg.m}^{-3}$ ▪ $C_{CFC} = 1,28 \pm 1,29 \text{ mg.m}^{-3}$ ▪ $C_{IOM}/C_{CFC} = 1,93$ - varie de 1,35 à 2,50 selon les postes de travail - asphalte : $C_{IOM}/C_{CFC} = 0,92$- varie de 0,67 à 1,54 selon les postes de travail <p>poste fixe (N = 17):</p> <ul style="list-style-type: none"> - aérosol : <ul style="list-style-type: none"> ▪ $C_{IOM} = 2,71 \pm 3,56 \text{ mg.m}^{-3}$ ▪ $C_{CFC} = 2,64 \pm 3,79 \text{ mg.m}^{-3}$ ▪ $C_{IOM}/C_{CFC} = 1,03$ - asphalte : $C_{IOM}/C_{CFC} = 0,94$ <p>régression (N = 58+17) : $C_{IOM} = 0,927 * C_{CFC} + 0,0032 \text{ (R}^2 = 0,996)$</p> | |
| Teikari <i>et al.</i> 2003 | comparaison interdispositifs | IOM Respicon Dekati Grimm | <p>Détermination graphique :</p> <p>Etude labo :</p> <p>$C_{cfc} / C_{iom} = 50\%$ $C_{respicon} / C_{iom} = 52\%$ $C_{grimm} / C_{iom} = 79,5\%$ $C_{dekati} / C_{iom} = 82\%$</p> <p>Etude terrain :</p> <p>$C_{cfc} / C_{iom} = \text{env } 41\%$ $C_{respicon} / C_{iom} = 72\%$ $C_{grimm} / C_{iom} = 79\%$ $C_{dekati} / C_{iom} = 70\%$</p> | |
| de Vocht <i>et al.</i> 2006 | Comparaison des différents dispositifs avec Caltool | IOM PAS-6 7-Hole | <p>Mixing :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $MG_{IOM} = 0,41 \text{ (1,74)}$ - $MG_{7-hole} = 0,23 \text{ (2,13)}$ - $MG_{PAS-6-left} = 0,31 \text{ (1,56)}$ - $MG_{PAS-6-right} = 0,31 \text{ (1,56)}$ - $MG_{PAS-6-right} = 0,25 \text{ (2,02)}$ - $MG_{caltool} = 0,38 \text{ (1,52)}$ <p>Curing :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $MG_{IOM} = 0,83 \text{ (2,37)}$ - $MG_{7-hole} = 0,52 \text{ (2,23)}$ - $MG_{PAS-6-left} = 0,53 \text{ (2,49)}$ - $MG_{PAS-6-right} = 0,55 \text{ (2,40)}$ - $MG_{caltool} = 0,67 \text{ (2,27)}$ | MG = Moyenne géométrique de la concentration en mg.m^{-3} (écart type géométrique) |
| Deygout <i>et al.</i> , 2010 | Comparaison interdispositifs | IOM CFC | <p>Fraction minérale :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $MG_{IOM} = 0,26 \text{ (2,73)}$ - $MG_{CFC} = 0,15 \text{ (2,77)}$ - $MG_{IOM}/MG_{CFC} = 1,82$ | MG = Moyenne géométrique de la concentration en mg.m^{-3} (écart type géométrique) |

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires |
|-------------------------------|--|---|---|------------------------------|
| | | | Fraction soluble dans le benzène : <ul style="list-style-type: none"> - $MG_{IOM} = 0,13 (2,66)$ - $MG_{CFC} = 0,13 (2,76)$ - $MG_{IOM}/MG_{CFC} = 1,02$ | |
| Kauffer <i>et al.</i> , 2010 | Comparaison différents dispositifs avec Caltool et avec CFC (comparaison avec inhalabilité en air calme) | IOM CFC CFC+capsule interne CIP10-I-V1 Button | VMAD = 13 à 28 μm : <ul style="list-style-type: none"> - $C_{IOM} / C_{Caltool} \text{ moyen} = 1,12 \pm 0,17$ - $C_{CFC} / C_{Caltool} \text{ moyen} = 0,62 \pm 0,13$ - $C_{CFC+capsule\ interne} / C_{Caltool} \text{ moyen} = 0,80 \pm 0,14$ - $C_{CIP10-I-V1} / C_{Caltool} \text{ moyen} = 0,94 \pm 0,11$ - $C_{Button} / C_{Caltool} \text{ moyen} = 0,86 \pm 0,08$ VMAD = 22 à 67 μm : <ul style="list-style-type: none"> - $C_{IOM} / C_{Caltool} \text{ moyen} = 4,53 \pm 4,71$ - $C_{CFC} / C_{Caltool} \text{ moyen} = 0,31 \pm 0,14$ - $C_{CFC+capsule\ interne} / C_{Caltool} \text{ moyen} = 0,62 \pm 0,08$ - $C_{CIP10-I-V1} / C_{Caltool} \text{ moyen} = 0,704 \pm 0,18$ - $C_{Button} / C_{Caltool} \text{ moyen} = 0,55 \pm 0,22$ C_{IOM} / C_{CFC} (régression linéaire) : <ul style="list-style-type: none"> - C_{IOM} / C_{CFC} (mesures statiques) = 2,01 (1,78-2,26) - C_{IOM} / C_{CFC} (mesures individuelles) = 2,09 (1,75-2,47) - C_{IOM} / C_{CFC} (ensemble) = 2,02 (1,83-2,22) $C_{CFC+capsule\ interne} / C_{CFC}$ (régression linéaire) : <ul style="list-style-type: none"> - $C_{CFC+capsule\ interne} / C_{CFC}$ (mesures statiques) = 1,74 (1,54 – 1,95) - $C_{CFC+capsule\ interne} / C_{CFC}$ (meures individuelles) = 1,57 (1,34-1,83) - $C_{CFC+capsule\ interne} / C_{CFC}$ (ensemble) = 1,68 (1,53-1,84) $C_{CIP10-I-V1} / C_{CFC}$ (régression linéaire) : <ul style="list-style-type: none"> - $C_{CIP10-I-V1} / C_{CFC}$ (mesures statiques) = 1,76 (1,57-1,97) - $C_{CIP10-I-V1} / C_{CFC}$ (mesures individuelles) = 2,01 (1,73-2,34) - $C_{CIP10-I-V1} / C_{CFC}$ (ensemble) = 1,84 (1,67-2,01) C_{Button} / C_{CFC} (régression linéaire) : <ul style="list-style-type: none"> - C_{Button} / C_{CFC} (mesures statiques) = 1,54 (1,34-1,77) - C_{Button} / C_{CFC} (mesures individuelles) = 1,36 (1,16-1,59) - C_{Button} / C_{CFC} (ensemble) = 1,46 (1,32-1,62) | |
| Skaugset <i>et al.</i> , 2013 | Comparaison interdispositifs | IOM - plastique CFC – 25mm Respicon | $MG (C_{IOM}/C_{Respicon}) = 1,13 \text{ à } 1,35$ $MG (C_{IOM}/C_{CFC-25mm}) = 3,04 \text{ à } 4,38$ $MG (\text{Min} - \text{max}, N) \text{ mg.m}^{-3}$ <ul style="list-style-type: none"> - $MG_{CFC} : 1,57 (0,14-17, 165)$ | MG : moyenne géométrique |

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires |
|-----------|---------------------|-------------|---|------------------------------|
| | | | <ul style="list-style-type: none">- MG_{IOM} : 6,60 (0,29-49,6, 165)- MG_{Respicon} : 2,91 (0,21-57,1, 889)- MG_{IOM} : 3,38 (0,29-65,7, 889) | |

Annexe 2.12 : Illustration des différents dispositifs de prélèvement de la fraction inhalable

(a) IOM, (b) 7-hole, (c) CFC, (d) GSP ou CIS, (e) Button (Li *et al.*, 2000).

Annexe 3 : Données issues de la littérature relatives aux dispositifs de prélèvement individuel de la fraction alvéolaire

Annexe 3.1 : Descriptif des études identifiées de comparaison des dispositifs de prélèvement à la fraction conventionnelle alvéolaire ou de comparaison entre différents dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire

| Référence | Type d'étude | Dispositifs testés ^a | Objectifs et conditions de l'étude |
|------------------------------|---|---|---|
| Liden & Kenny (1993) | Comparaison fraction conventionnelle | SIMPEDS (cyclone HD) 10 mm cyclone (cyclone DO) MRE 113A | <p>Modélisation de l'efficacité de collecte à partir de données expérimentales.</p> <p>Performance du dispositif évaluée à partir de carte de biais</p> <p>Optimisation du débit pour comparaison à la courbe conventionnelle.</p> <p>3 modèles de distribution log normale d'aérosols</p> <p>1/ MMAD : [1-10 μm] (pas de 1 μm) puis [12-24] μm (pas de 2 μm) GSD [1,5 – 3,5] (pas de 0,25)</p> <p>2/ MMAD [5 – 18 μm] GSD [1,75 – 2,75]</p> <p>3/ MMAD [1 – 30 μm] GSD [1 – 4] basé sur 34 aérosols de terrain</p> <ul style="list-style-type: none"> Débits testés : <p>Cyclone DO : 1,7 et 2 L.min⁻¹</p> <p>Cyclone HD : 1,9 et 2,1 L.min⁻¹</p> |
| Kenny & Gussman (1997) | Comparaison fraction conventionnelle | SRI – IV SRI – V SRI - III GK 1.52 (cyclone GK) GK 2.69 (cyclone GK) GK 3.45 (cyclone GK) | <p>Performance du dispositif évaluée en fonction du débit – modèle empirique d'estimation du diamètre de coupure D₅₀</p> <p>+ à partir de carte de biais – distribution lognormale MMAD [1-25] μm GSD [1,5 – 3,5]</p> <p>Comparaison à la courbe conventionnelle.</p> <p>Chambre expérimentale à vitesse d'air calme</p> <ul style="list-style-type: none"> Génération d'un aérosol en verre sphérique solide ($\rho = 2,45 \text{ g.cm}^{-3}$) Débit testé : 1 à 11 L.min⁻¹ <p>GK 2.69 : 4,2 L.min⁻¹</p> |
| Gautam <i>et al.</i> , 1997 | Comparaison fraction conventionnelle | cyclone DO Multi inlet cyclone (cyclone GS) | <p>Performance du dispositif évaluée à partir de carte de biais – distribution lognormale MMAD [2 – 30] μm GSD [2 – 6]</p> <p>Optimisation du débit pour comparaison à la courbe conventionnelle.</p> <p>Tunnel horizontal (0,45 x 0,45 x 3,66 m)</p> <ul style="list-style-type: none"> Vitesses d'air : 1,25 ; 2,43 et 4,15 m.s⁻¹ Génération d'un aérosol de charbon ($\rho = 1,46 \text{ g.cm}^{-3}$) : MMAD = 3,5 μm ; GSD = 2 Débits testés : 2, 1,7 et 1,5 L.min⁻¹ <p>Orientation du dispositif : 0,90 et 180 °</p> |
| Courbon <i>et al.</i> , 1988 | Comparaison fraction conventionnelle ancienne ACGIH et BMRC | CIP-10 R | <p>Etude expérimentale en laboratoire avec un système rotatif – courbe empirique d'efficacité en fonction du Dae</p> <p>Chambre expérimentale horizontale à vitesse d'air calme sans plus de précision</p> |

| Référence | Type d'étude | Dispositifs testés ^a | Objectifs et conditions de l'étude |
|---------------------|--------------------------------------|---|---|
| | | | Génération de 2 types d'aérosol coal dust $\rho = 1,45 \text{ g.cm}^{-3}$. Caractérisation par K7 ouverte ; aluminium oxide $\rho * 3,96 \text{ g.cm}^{-3}$ |
| NIOSH 0600 (1998) | Comparaison fraction conventionnelle | 10 mm cyclone (cyclone DO) Cyclone HD AI cyclone | Performance du dispositif évaluée à partir de carte de biais (méthode issue de l'article Bartley et al., 1994) – MMAD [0-25] μm GSD [1,5 – 3,5] <ul style="list-style-type: none"> Débit testé : <ul style="list-style-type: none"> Cyclone DO : 1,7 L.min⁻¹ Cyclone HD : 2,2 L.min⁻¹ Cyclone AI : 2,5 L.min⁻¹ |
| Chen et al., 1999 | Comparaison fraction conventionnelle | 10 mm nylon cyclone (cyclone DO) Cyclone SKC AI Multi inlet cyclone (cyclone GS) Big Body cyclone | Performance du dispositif évaluée en fonction de différentes caractéristiques de l'aérosol et étude du dépôt sur les parois Tunnel vertical Vitesse d'air non renseignée <ul style="list-style-type: none"> Génération d'aérosols de tailles et de concentrations différentes : <ul style="list-style-type: none"> PST potassium sodium tartrate - CMD (count median diameter) 3,5 μm GSD = 1,3 PST potassium sodium tartrate -CMD=7,4 μm GSD = 1,5 MB Methylene blue – CMD=3,56 μm GSD = 1,27 NaCl – CMD=3,49 μm GSD = 1,29 DOP Dioctyl phthalate - - CMD=3,53 μm GSD = 1,45 Débit testé : <ul style="list-style-type: none"> Cyclone DO : 1,65 L.min⁻¹ Cyclone SKC AI : 2,67 L.min⁻¹ Tests dans différentes conditions d'humidité relative : 10 à 80% |
| Tsai et al (1999) | Comparaison fraction conventionnelle | 10 mm nylon cyclone (cyclone DO) 18 mm AI cyclone | Performance du dispositif évaluée en fonction de différentes caractéristiques de l'aérosol et étude du dépôt sur les parois Chambre expérimentale ($\varnothing = 15 \text{ cm}$ H 30 cm) Vitesse d'air : 1 cm.s ⁻¹ <ul style="list-style-type: none"> Génération d'un aérosol monodispersé d'ammonium solide ($\rho = 1,35 \text{ g.cm}^{-3}$, MMAD [1-10] μm GSD [1,2 – 2,5]) Débit testé : 1,7 L.min⁻¹ |
| Görner et al., 2001 | Comparaison fraction conventionnelle | CATHIA Lippmann 12 mm Cyclone static sampler USA Cyclone DP-20 Cyclone DP-50 Cyclone TBF - 50 Lippmann 6 mm Cyclone personal sampler USA | Performance du dispositif évaluée à partir de carte de biais – distribution lognormale MMAD [1-25] μm (pas de 1 μm) GSD [2 – 3,5] (pas de 0,25) Optimisation du débit pour comparaison à la courbe conventionnelle. Tunnel horizontal (1 m ²) Vitesse d'air calme ~15 cm.s ⁻¹ <ul style="list-style-type: none"> Génération d'un aérosol de charbon : MMAD = 3,5 μm GSD = 2 Débites testés : |

| Référence | Type d'étude | Dispositifs testés ^a | Objectifs et conditions de l'étude |
|-------------------------------|---|--|--|
| | | ODPN Cyclone personal sampler Czech. Rep, "Impacteur CXF-2Chine" CIP-10 R MRE 113 A static sampler GB Cyclone DO personal sampler USA Cyclone DO personal sampler USA SKC plastic Cyclone personal sampler GB Casella cyclone personal sampler GB (cyclone HD) SKC AI Cyclone personal sampler GB Cyclone personal sampler South Afr. | Cyclone DO : 1,5 ; 1,7 et 2 L.min ⁻¹ Cyclone HD : 2,4 L.min ⁻¹ Cyclone AI: 1,9 et 2,2 L.min ⁻¹ CIP=10R : 10 L.min ⁻¹ |
| Lee et al (2010) | Comparaison fraction conventionnelle + Comparaison entre différents dispositifs : CIP10 vs cyclone DO ou HD | CIP-10 R GK2.69 (cyclone GK) FSP10 (Cyclone HD) | Performance du dispositif évaluée à partir de carte de biais – distribution lognormale MMAD [1-25] µm GSD [1,5 – 3,5] Comparaison à la courbe conventionnelle. Comparaison des masses prélevées par les différents dispositifs Chambre expérimentale (Ø = 53 cm H 69 cm) Vitesse d'air calme sans plus de précision <ul style="list-style-type: none"> Génération de différents types d'aérosols : Aluminium oxide F800 : MMAD = 4,45 µm (GSD = 1,52) Aluminium oxide F1200 : MMAD = 2,86 µm (GSD = 2,01) Kaolin : MMAD = 2,21 (GSD = 1,78) Débit testé : CIP-10 R et FSP 10 : 10 L.min⁻¹ GK2.69 : 4,2 L.min⁻¹ |
| HSL (2011) | Comparaison fraction conventionnelle | GK 4.162 (cyclone GK) | Performance du dispositif évaluée selon EN 13205 en fonction du débit– modèle empirique d'estimation du diamètre de coupure D₅₀ + à partir de carte de biais – distribution lognormale MMAD [1-30] µm GSD [1,75 – 4] Comparaison à la courbe conventionnelle. Chambre expérimentale à vitesse d'air calme Génération d'un aérosol en verre polydispersé ballotini Débit testé : 7 à 10 L.min ⁻¹ |
| Verpaele <i>et al.</i> (2013) | Comparaison entre 6 dispositifs cyclones et CIP 10 | SKC Cyclone + PVC Filter SKC Cyclone + polycarbonate filter | Etude de terrain avec un système rotatif (WAM – workplace Atmosphere Multi-sampler) permettant de disposer 12 dispositifs de prélèvement simultanément |

| Référence | Type d'étude | Dispositifs testés ^a | Objectifs et conditions de l'étude |
|-----------------------------|---|--|---|
| | | Cyclone DO, BCIRA (cyclone HD) SIMPEDS (cyclone HD) CIP-10 R | Comparaison des masses prélevées par les différents dispositifs + Comparaison de la masse prélevée par chaque dispositif avec la concentration médiane issue des différentes mesures sur le site. |
| Hu <i>et al.</i> (2014) | | FSP 2 (cyclone HD) FSP 10 (cyclone HD) | Etude de terrain visant à analyser des blancs et étudier les effets de charges électrostatiques pour chaque dispositif <ul style="list-style-type: none"> Débit testé : <p>FSP 2(cyclone HD) : 2 L.min⁻¹ FSP 10(cyclone HD) : 10 L.min⁻¹</p> |
| Soo <i>et al.</i> (2014) | Comparaison entre 4 dispositifs cyclones : 10 mm DO, SKC AI, BGI4L et GK2.69 | 10 mm DO (Cyclone DO) SKC AI cyclone BGI4L cyclone (cyclone HD) GK 2.69 (cyclone GK) Tests avec des cassettes 37 mm et 25 mm en polystyrène (P) ou polypropylène (SD : static-dissipative) | Comparaison des masses prélevées par les différents dispositifs Etude des dépôts sur les parois Chambre expérimentale (Ø = 53 cm H 69 cm) Vitesse d'air calme sans plus de précision Génération d'aérosol de charbon contenant du quartz avec système de neutralisation – diffusion radiale Débit testé : Cyclone DO : 1,7 L.min ⁻¹ Cyclone HD : 2,2 L.min ⁻¹ Cyclone GK : 4,4 L.min ⁻¹ Cyclone AI : 2,5 L.min ⁻¹ |
| Stacey <i>et al.</i> (2014) | Comparaison de différents dispositifs : cyclone GK, cyclone HD et CIP10vs SIMPEDS | SIMPEDS (cyclone HD) GK2.69 (cyclone GK) FSP 10 (cyclone HD) CIP-10R | Etude expérimentale comparant les concentrations obtenues par chaque dispositif avec la concentration moyenne issue des différents dispositifs. Ratio de concentration entre chaque dispositif et SIMPEDS Chambre expérimentale de 1 m ³ à vitesse d'air calme ~0,4 cm.s ⁻¹ avec système rotatif intégrant 15 dispositifs de prélèvement Génération de 2 aérosols ultrafin et médium : "ultrafine ARD : 0-10 µm ; MMAD = 2,8 µm" "medium ARS : 0-80 µm ; MMAD = 4,6 µm" Débit testé : SIMPEDS: 2,2 L.min ⁻¹ FSP 10 : 10 L.min ⁻¹ GK 2.69 : 4,2 L.min ⁻¹ CIP-10R : 10 L.min ⁻¹ |
| Stacey <i>et al.</i> (2016) | Comparaison de différents dispositifs : cyclone GK, cyclone HD et PPI8vs SIMPEDS | SIMPEDS (cyclone HD) GK2.69 (cyclone GK) GK4.162 (cyclone GK) FSP 10 (cyclone HD) PPI 8 (impacteur) | Etude expérimentale comparant les concentrations obtenues par les différents dispositifs - Ratio de concentration entre chaque dispositif et SIMPEDS Tunnel de 12 x 2 x 1,5 m ³ à vitesse d'air 1 ou 2 m.s ⁻¹ avec mannequin rotatif |

| Référence | Type d'étude | Dispositifs testés ^a | Objectifs et conditions de l'étude |
|-----------------------------------|--|--|---|
| | | | <p>Génération de 4 aérosols : MMAD [8 -25 µm] GSD [1,6 -2]</p> <p>Aloxite (grade 1000) : MMAD = 9 µm</p> <p>ARD : ρ = 2,65 g.cm⁻³,</p> <p>Coal dust : ρ = 1,5 g.cm⁻³,</p> <p>Mullite powder : ρ = 2,6 g.cm⁻³,</p> <ul style="list-style-type: none"> • Débit testé : <p>SIMPEDS: 2,2 L.min⁻¹</p> <p>GK 2.69 : 4,2 L.min⁻¹</p> <p>GK 4.162 : 9 L.min⁻¹</p> <p>FSP 10 : 10 L.min⁻¹</p> <p>PPI8 : 8 L.min⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Orientation du dispositif : <p>0°, 180° et en rotation</p> |
| Lee <i>et al.</i> (2016) | <p>Comparaison entre différents dispositifs :</p> <p>CIP10/10 mm DO</p> <p>FSP10 / 10 mm DO</p> <p>GK2,68 / 10 mm DO</p> | <p>10 mm cyclone (cyclone DO)</p> <p>BGI4L cyclone (cyclone HD)</p> <p>GK2.69 (cyclone GK)</p> <p>→ Tests avec des cassettes en polypropylène pour minimiser les dépôts sur les parois</p> <p>FSP 10 (cyclone HD)</p> <p>CIP 10 R</p> | <p>Etude de terrain avec des mesures d'exposition personnelle sur des travailleurs volontaires ou avec un système stationnaire intégrant 5 dispositifs de prélèvement</p> <p>Comparaison des masses prélevées par paire : CIP10/10 mm DO ; FSP10 / 10 mm DO ; GK2.69 / 10 mm</p> <p>CIP10/HD ; FSP10 / HD ; GK2.69 / HD</p> <ul style="list-style-type: none"> • Débit testé : <p>Cyclone DO : 1,7 L.min⁻¹</p> <p>Cyclone HD : 2,2 L.min⁻¹</p> <p>CIP-10 R: 10 L.min⁻¹</p> <p>FSP 10 : 11,2 L.min⁻¹</p> <p>GK2.69 : 4,4 L.min⁻¹</p> |
| Metropol CIP10 (2017) | <p>Comparaison fraction conventionnelle</p> | <p>CIP 10-R</p> | <p>Performance du dispositif à partir de carte de biais (méthode issue de l'article Bartley <i>et al.</i> 1994) – MMAD [1-25] µm GSD [1,5 – 3,5]</p> <p>Tunnel avec une vitesse d'air calme</p> <ul style="list-style-type: none"> • Génération d'un aérosol polydispersé • Débit testé : <p>CIP-10R : 10 L.min⁻¹</p> |
| SKC Plastic cyclone notice (2018) | <p>Comparaison fraction conventionnelle</p> | <p>Cyclone SKC plastique (cyclone HD)</p> | <p>Performance du dispositif à partir de carte de biais – MMAD [1-30] µm GSD [1,75 – 4]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Débit testé : <p>Cyclone HD : 3 L.min⁻¹</p> |
| Metropol Cyclone (2019) | <p>Comparaison fraction conventionnelle</p> | <p>Cyclone DO</p> <p>Cyclone GK2.69 (cyclone GK)</p> <p>Cyclone GK 4.162 (cyclone GK)</p> | <p>Performance du dispositif à partir de carte de biais (méthode issue de l'article Bartley <i>et al.</i> 1994) – MMAD [1-25] µm GSD [1,5 – 3,5]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Débit testé : <p>Cyclone DO : 1,5 et 1,7 L.min⁻¹</p> <p>Cyclone GK 2.69 : 4,2 et 1,6 L.min⁻¹ (respectivement fraction alvéolaire et thoracique)</p> |

| Référence | Type d'étude | Dispositifs testés ^a | Objectifs et conditions de l'étude |
|-----------|--------------|---------------------------------|--|
| | | | Cyclone GK 4.162 : 8,5 et 3 L.min ⁻¹ (respectivement fraction alvéolaire et thoracique) |

^a les dispositifs de prélèvement notés en gras correspondent à des dispositifs de prélèvement individuels et commercialisés (les autres dispositifs permettent de réaliser des mesures à poste fixe ou bien sont particuliers et non commercialisés).

Annexe 3.2 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des cyclones Dorr Oliver (DO) avec la convention alvéolaire

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|----------------------|---|-------------------------------|--|--|
| Lidén & Kenny (1993) | NC | air calme | <p>Débit optimisé de 1,7 L.min⁻¹ Biais déterminé graphiquement à partir des courbes d'efficacité</p> <p>1 µm : E = 100%, B = 3% 2 µm : E = 96%, B = 5% 3 µm : E = 85%, B = 15% 4 µm : E = 56%, B = 12% 5 µm : E = 23%, B = -23% 6 µm : E = 10%, B = -40% 7 µm : E = 5%, B = -45% 8 µm : E = 2,5%, B = -48% 10 µm : E = 1%, B = -26%</p> <p>Biais moyen pour le débit de 2 L.min⁻¹ 0,9% : 1/MMAD 1-10 µm 1,9% : 2/ MMAD 5-18 µm 19,6 % : 3/ MMAD <1 et > 30 µm</p> <p>Carte de biais >±10% MMAD [1 -3] (GSD ≤1,50) MMAD [4-30] (GSD croissant de 1,25 à 2,50)</p> | |
| Gautam et al., 1997 | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 0° | 1,52 | <p>Débit optimisé de 1,5 L.min⁻¹ : biais moyen : 7,5% Biais déterminé graphiquement sur la courbe d'efficacité :</p> <p>1,5 µm : E = 100%, B = +5% 1,9 µm : E = 96%, B = +4% 2,6 µm : E = 87%, B = +6% 3 µm : E = 80%, B = +8% 3,4 µm : E = 65%, B = +1% 3,9 µm : E = 45%, B = -14% 4,5 µm : E = 28%, B = -28%</p> <p>Débit de 1,7 L.min⁻¹ D₅₀ = 3,54 µm; Biais moyen : -20%</p> <p>Carte de biais > ±10% : MMAD [5-30] (GSD croissant de 1,25 à 5)</p> | => restriction aérosol de diamètre inférieur à 5 µm |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 90° | 1,52 | <p>D₅₀ = 3,09 µm; Biais moyen : -25%</p> <p>Carte de biais > ±10% : MMAD [0-30] (GSD [2-5])</p> | Orientation de 90 et 180 ° réduisent le diamètre de coupure avec une augmentation du biais. Cela est également observé à des vitesses d'air plus élevées |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 180° | 1,52 | <p>D₅₀ = 3,09 µm; Biais moyen : -24,5%</p> <p>Carte de biais > ±10% : MMAD [0-30] (GSD [2-5])</p> | |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 0° | 2,43 | <p>D₅₀ = 3,25 µm; Biais moyen : -23,6%</p> | => restriction aérosol de diamètre inférieur à 5 µm |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 90° | 2,43 | <p>D₅₀ = 2,88 µm; Biais moyen : -26,8%</p> | |

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|---------------------------|---|-------------------------------|--|--|
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 180° | 2,43 | D50 = 2,82 µm; Biais moyen : -23,8% | coupure avec une augmentation du biais |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 0° | 4,15 | D50 = 3,01 µm; Biais moyen : -28,9% | |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 90° | 4,15 | D50 = 2,75 µm; Biais moyen : -27,6% | |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 180° | 4,15 | D50 = 2,70 µm; Biais moyen : -21,1% | |
| NIOSH 0600 (1998) | NR | NR | Débit de 1,7 L.min ⁻¹ Carte de biais > ±10% : MMAD [7,5-25] (GSD croissant de 1,5 à 2,25) | |
| Chen <i>et al.</i> , 1999 | entrée du dispositif perpendiculaire au flux d'air | NR | <p>Biais déterminé graphiquement à partir des courbes d'efficacité</p> <p>Pas de différence en fonction de la concentration pour un même type d'aérosol. Equilibre atteint sur la courbe de pénétration après 1 heure d'exposition avec une diminution de l'efficacité de collecte : sous estimation de 20% (-30 à 50%)</p> <p>Différence en fonction du type d'aérosol – HR = 10%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aérosol PST Conc = 4,6 mg.m⁻³ et 15,1 mg.m⁻³ : <ul style="list-style-type: none"> 1 µm : E = 95%, B = -2% 2 µm : E = 95%, B = 4% 3 µm : E = 81%, B = 10% 4 µm : E = 50%, B = 0% 5 µm : E = 25%, B = -17% 6 µm : E = 10%, B = -40% 6,5 µm : E = 7%, B = -43% • MB Conc = 6,1 mg.m⁻³ : <ul style="list-style-type: none"> 1 µm : E = 95%, B = -2% 2 µm : E = 93%, B = 2% 3 µm : E = 80%, B = 8% 4 µm : E = 47%, B = -6% 5 µm : E = 24%, B = -20% 6 µm : E = 10%, B = -40% 6,5 µm : E = 5%, B = -60% • NaCl Conc = 4,1 mg.m⁻³ : <ul style="list-style-type: none"> 1 µm : E = 95%, B = -2% 2 µm : E = 95%, B = 4% 3 µm : E = 82%, B = 11% 4 µm : E = 47%, B = -6% 5 µm : E = 22%, B = -27% 6 µm : E = 7%, B = -58% • DOP Conc = 9,7 mg.m⁻³ : <ul style="list-style-type: none"> 1 µm : E = 95%, B = -2% | <p>Diminution de l'efficacité pour les diamètres de 2 à 5 µm en fonction du type d'aérosol, de la concentration et du temps de prélèvement</p> <p>Humidité relative élevée augmente le biais</p> |

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------|-------------|-------------------------------|--|------------------------------|
| | | | <p>2 µm : E = 95%, B = 4%</p> <p>3 µm : E = 83%, B = 12%</p> <p>4 µm : E = 47%, B = -6%</p> <p>5 µm : E = 18%, B = -40%</p> <p>6 µm : E = 7%, B = -58%</p> <p>6,5 µm : E = 3%, B = -76%</p> <p>Différence en fonction de l'humidité relative (%) sur un aérosol hygroscopique :</p> <ul style="list-style-type: none"> • HR =10% : <ul style="list-style-type: none"> 1 µm : E = 95%, B = -2% 2 µm : E = 95%, B = 4% 3 µm : E = 81%, B = 10% 4 µm : E = 50%, B = 0% 5 µm : E = 25%, B = -17% 6 µm : E = 10%, B = -40% 6,5 µm : E = 7%, B = -43% • HR =40% : <ul style="list-style-type: none"> 1 µm : E = 100%, B = 3% 1,5 µm : E = 100%, B = 5% 2 µm : E = 100%, B = 9% 2,5 µm : E = 98%, B = 16% 3 µm : E = 90%, B = 22% 3,5 µm : E = 75%, B = 21% 4 µm : E = 50%, B = 0% 4,5 µm : E = 33%, B = -16% 5 µm : E = 17%, B = -43% 5,5 µm : E = 10%, B = -56% 6 µm : E = 4%, B = -76% • HR =60% <ul style="list-style-type: none"> 1 µm : E = 100%, B = 3% 1,5 µm : E = 100%, B = 5% 2 µm : E = 100%, B = 9% 2,5 µm : E = 100%, B = 19% 3 µm : E = 96%, B = 30% 3,5 µm : E = 80%, B = 29% 4 µm : E = 47%, B = -6% 4,5 µm : E = 25%, B = -36% 5 µm : E = 8%, B = -73% 5,5 µm : E = 2%, B = -91% 6 µm : E = 1%, B = -94% • HR=80% : <ul style="list-style-type: none"> 1 µm : E = 100%, B = 3% 1,5 µm : E = 100%, B = 5% 2 µm : E = 100%, B = 9% 2,5 µm : E = 100%, B = 19% 3 µm : E = 98%, B = 33% 3,5 µm : E = 81%, B = 31% 4 µm : E = 50%, B = 0% 4,5 µm : E = 28%, B = -28% 5 µm : E = 8%, B = -73% 5,5 µm : E = 2%, B = -91% 6 µm : E = 1%, B = -94% | |

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------------------------|--|-------------------------------|--|---|
| Tsai <i>et al.</i> 1999 | Entrée du dispositif perpendiculaire au flux d'air | 0,01 | <p>Différence en fonction du dépôt sur les parois d'un aérosol monodispersé de diamètre aérodynamique variant de 1 à 10 µm :</p> <p>0 mg : D50 = 4,31 2 µm : E = 100%, B = 9% 3 µm : E = 94%, B = 27% 4 µm : E = 60%, B = 20% 5 µm : E = 23%, B = -23% 6 µm : E = 6%, B = -64% 7 µm : E = 4%, B = -56%</p> <p>0,3 mg : D50 = 3,72 2 µm : E = 98%, B = 7% 3 µm : E = 85%, B = 15% 4 µm : E = 35%, B = -30% 5 µm : E = 12%, B = -60% 6 µm : E = 3%, B = -82% 7 µm : E = 0%, B = -100%</p> <p>0,6 mg : D50 = 3,55 2 µm : E = 100%, B = 9% 3 µm : E = 73%, B = -1% 4 µm : E = 30%, B = -40% 5 µm : E = 8%, B = -73% 6 µm : E = 3%, B = -82% 7 µm : E = 0%, B = -100%</p> <p>3 mg : D50 = 3,47 2 µm : E = 95%, B = 4% 3 µm : E = 67%, B = -9% 4 µm : E = 30%, B = -40% 5 µm : E = 12%, B = -60% 6 µm : E = 8%, B = -52% 7 µm : E = 0%, B = -100%</p> <p>Différence en fonction de la charge électrostatique : MMAD = 3,06 µm : dès 100 unités de charge : Efficacité de collecte diminue de 92,4% à 69,4% MMAD = 3,76 µm : Efficacité de collecte diminue de 75 à 30% "MMAD = 4,04 µm : Efficacité de collecte diminue de 62 à 25% "MMAD = 4,7 µm : dès 1000 unités de charge : diminution de la pénétration de 48% à 30% "MMAD = 6,7 µm : Efficacité de collecte varie peu autour de 5%</p> | Influence du dépôt sur les parois et de la charge électrostatique plus important sur la pénétration des particules de diamètre proche au D50 de 4 µm avec des charges de plusieurs milliers d'unité de charge |
| Görner <i>et al.</i> , 2001 | NR | 0,15 | <p>Débit de 1,7 L.min⁻¹ D₅₀ = 3,55 µm (pente = 1,28); BPC : 49%</p> <p>Débit optimisé de 1,5 L.min⁻¹ D₅₀ = 4,16 µm (pente = 1,28); Bias criteria performance (BPC) = 84% Carte de biais >±10% : - MMAD ≥ 12 (GSD = 2) - MMAD ≥ 16 (GSD ≤ 2,25) - MMAD ≥ 22 (GSD ≤ 2,5)</p> | => restriction aérosols MMAD ≤ 12 µm |

Annexe 3.3 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des cyclones AI avec la convention alvéolaire

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Dispositifs testés | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|---------------------------|--|-------------------------------|--------------------|---|-------------------------------------|
| NIOSH 0600 (1998) | NR | NR | AI cyclone | Débit de 2,5 L.min ⁻¹ Carte de biais > ±10% : MMAD [7,5-25] (GSD croissant de 1,5 à 2,25) | |
| Chen <i>et al.</i> , 1999 | entrée du dispositif perpendiculaire au flux d'air | NR | SKC AI | Débit de 2,67 L.min ⁻¹ pour un D ₅₀ = 4 µm Biais déterminé graphiquement à partir des courbes d'efficacité Différence en fonction du type d'aérosol – HR = 10% <ul style="list-style-type: none"> Aérosol PST Conc = 4,6 mg.m⁻³ <ul style="list-style-type: none"> 1,2 µm : E = 95%, B = -1% 2 µm : E = 91%, B = 0% 3 µm : E = 73%, B = -1% 4 µm : E = 45%, B = -10% 5 µm : E = 18%, B = -40% 6 µm : E = 5%, B = -70% 7 µm : E = 2%, B = -78% 8 µm : E = 1%, B = -79% Aérosol PST Conc = 15,1 mg.m⁻³ : <ul style="list-style-type: none"> 1,2 µm : E = 97%, B = 1% 2 µm : E = 95%, B = 4% 3 µm : E = 75%, B = 2% 4 µm : E = 42%, B = -16% 5 µm : E = 17%, B = -43% 6 µm : E = 4%, B = -76% 7 µm : E = 1%, B = -89% 8 µm : E = 0,5%, B = -90% <p>Sur-estimation après 3 heures pour la concentration élevée pour les diamètre de 4 à 7 µm indiquant un dépôt sur les parois avec un équilibre atteint tardivement entre le dépôt et le ré-entraînement de l'aérosol</p> | |
| Tsai <i>et al.</i> 1999 | Entrée du dispositif perpendiculaire au flux d'air | 0,01 | 18 mm AI cyclone | Différence en fonction du dépôt sur les parois d'un aérosol monodispersé de diamètre aérodynamique variant de 1 à 10 µm : <ul style="list-style-type: none"> 0 mg : D₅₀ = 4,29 2 µm : E = 100%, B = 9% 3 µm : E = 90%, B = 22% 4 µm : E = 62%, B = 24% 5 µm : E = 30%, B = 0% 6 µm : E = 13%, B = -22% 7,5 µm : E = 4%, B = -39% <ul style="list-style-type: none"> 0,3 mg : D₅₀ = 4,10 2 µm : E = 95%, B = 4% 3 µm : E = 84%, B = 14% 4 µm : E = 52%, B = 4% 5 µm : E = 27%, B = -10% 6 µm : E = 12%, B = -28% | => restriction aérosol peu dispersé |

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Dispositifs testés | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------------------------|-------------|-------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------------|
| | | | | <p>0,6 mg : D50 = 3,96 2 µm : E = 95%, B = 4% 3 µm : E = 90%, B = 22% 4 µm : E = 52%, B = 4% 5 µm : E = 27%, B = -10% 6 µm : E = 13%, B = -22%</p> <p>3 mg : D50 = 3,91 2,5 µm : E = 90%, B = 7% 3 µm : E = 82%, B = 11% 4 µm : E = 46%, B = -8% 5 µm : E = 22%, B = -27% 6 µm : E = 8%, B = -52% 7 µm : E = 4%, B = -56%</p> <p>Pas de différence significative en fonction de la charge électrostatique de 4 à 1300 : MMAD = 3,06 µm Efficacité de collecte varie peu autour de 85% MMAD = 3,76 µm Efficacité de collecte diminue de 70 à 45% MMAD = 4,38 µm Efficacité de collecte diminue de 40 à 30% MMAD = 5,05 µm Efficacité de collecte diminue de 30 à 20% MMAD = 5,45 µm Efficacité de collecte varie peu autour de 15%</p> | |
| Görner <i>et al.</i> , 2001 | NR | 0,15 | SKC AI cyclone personal sampler | <p>Débit de 1,9 L.min⁻¹ D₅₀ = 4,93 µm (pente = 1,25)</p> <p>Débit optimisé de 2,2 L.min⁻¹ D₅₀ = 4,24 µm (pente = 1,29), Bias criteria performance BPC = 86%</p> <p>Carte de biais >±10% : - MMAD ≥ 12 (GSD =2) - MMAD ≥ 17 (GSD ≤ 2,25) - MMAD ≥ 24 (GSD ≤ 2,5)</p> | => restriction aérosols MMAD ≤ 12 µm |

Annexe 3.4 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des cyclones GS avec la convention alvéolaire

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------------------------|---|-------------------------------|---|---|
| Gautam <i>et al.</i> , 1997 | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 0° | 1,52 | Débit de 2,6 L.min ⁻¹ : D ₅₀ = 3,80 µm biais <± 10% (Carte de biais variant de -4 à 1%) Biais déterminé graphiquement sur la courbe d'efficacité : 1 µm : E = 94%, B = -3% 2,1 µm : E = 91%, B = 1% 3 µm : E = 76%, B = 3% 3,4 µm : E = 65%, B = 1% 3,9 µm : E = 49%, B = -6% 4,8 µm : E = 25%, B = -25% 5,6 µm : E = 18%, B = -15% 6 µm : E = 18%, B = 7% Débit de 2,5 L.min ⁻¹ D ₅₀ = 3,95 µm; Biais <± 10% (Carte de biais variant de -4 à 1%) Biais déterminé graphiquement sur la courbe d'efficacité : 1 µm : E = 97,5%, B = 0% 2,1 µm : E = 94%, B = 4% 2,6 µm : E = 87%, B = 6% 3 µm : E = 78%, B = 6% 3,9 µm : E = 49%, B = -6% 4,9 µm : E = 30%, B = -5% | Pas de différence sur le diamètre de coupure en fonction de l'orientation |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 90° | 1,52 | Débit de 2,5 L.min ⁻¹ D ₅₀ = 3,82 µm; Biais moyen : -1,43% Biais < ±10% (Carte de biais variant de -3 à 0%) | |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 180° | 1,52 | Débit de 2,5 L.min ⁻¹ D ₅₀ = 3,86 µm; Biais moyen : -0,81% Biais < ±10% (Carte de biais variant de -4 à -1%) | |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 0° | 2,43 | Débit de 2,5 L.min ⁻¹ D ₅₀ = 3,82 µm; Biais moyen : -1,97% | Augmentation du biais avec des vitesses d'air élevées. |
| | entrée du dispositif parallèle au flux d'air orientation à 0° | 4,15 | Débit de 2,5 L.min ⁻¹ D ₅₀ = 3,58 µm; Biais moyen : -10,13% | |
| Chen <i>et al.</i> , 1999) | entrée du dispositif perpendiculaire au flux d'air | NR | Débit de 2,13 L.min ⁻¹ pour un D ₅₀ = 4µm Biais déterminé graphiquement à partir des courbes d'efficacité Différence en fonction du type d'aérosol – HR = 10% • Aérosol PST Conc = 4,6 mg.m ⁻³ 1,2 µm : E = 97%, B = 1% 2 µm : E = 92%, B = 1% 3 µm : E = 74%, B = 0% 4 µm : E = 48%, B = -4% 5 µm : E = 26%, B = -13% 6 µm : E = 12%, B = -28% 7 µm : E = 9%, B = -1% 8 µm : E = 5%, B = 4% | |

| | | | | |
|--|--|--|---|--|
| | | | <ul style="list-style-type: none">• Aérosol PST Conc = 15,1 mg.m⁻³ :<ul style="list-style-type: none">1,2 µm : E = 98%, B = 2%2 µm : E = 95%, B = 4%3 µm : E = 78%, B = 6%4 µm : E = 48%, B = -4%5 µm : E = 28%, B = -7%6 µm : E = 12%, B = -28%7 µm : E = 9%, B = -1%8 µm : E = 5%, B = 4% | |
| | | | <p>Différence d'efficacité après 3 heures d'exposition qui est d'autant plus importante pour les diamètres de 2 à 5 µm.</p> <p>Sur-estimation après 3 heures pour la concentration élevée</p> | |

Annexe 3.5 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des cyclones Higgins Dewell (HD) avec la convention alvéolaire

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Dispositifs testés | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------------------------|---|-------------------------------|---------------------|--|--|
| Lidén & Kenny (1993) | NC | air calme | SIMPEDS | <p>Débit optimisé de 2,1 L.min⁻¹ Biais déterminé graphiquement à partir des courbes d'efficacité</p> <p>1 µm : E = 100%, B = 3% 2 µm : E = 96%, B = 5% 3 µm : E = 85%, B = 15% 4 µm : E = 56%, B = 12% 5 µm : E = 27%, B = -10% 6 µm : E = 10%, B = -40% 7 µm : E = 5%, B = -45% 8 µm : E = 2,5%, B = -48% 10 µm : E = 1%, B = -26%</p> <p>Biais moyen pour le débit de 1,9 L.min⁻¹ 6,5% : 1/MMAD 1-10 µm 8,2% : 2/ MMAD 5-18 µm 10 % : 3/ MMAD <1 et > 30 µm</p> <p>Carte de biais >±10% MMAD [1 -3] (GSD ≤1,50) MMAD [4-30] (GSD croissant de 1,25 à 2,30)</p> | => restriction aérosol dispersé |
| NIOSH 0600 (1998) | NR | NR | Higgins-Dewell | <p>Débit de 2,2 L.min⁻¹ Carte de biais > ±10% : MMAD [7-25] (GSD croissant de 1,5 à 2,4)</p> | |
| Görner <i>et al.</i> , 2001 | NR | 0,15 | Casella plastic | <p>Débit de 1,9 L.min⁻¹ D₅₀ = 4,03 µm (pente = 1,27); BPC : 68%</p> <p>Carte de biais >±10% : - MMAD ≥ 8 (GSD =2) - MMAD ≥ 11 (GSD = 2,25) - MMAD ≥ 14 (GSD = 2,5) - MMAD ≥ 18 (GSD = 2,75) - MMAD ≥ 23 (GSD = 3)</p> | => restriction aérosols MMAD ≤ 7-8 µm |
| | | | SKC Plastic cyclone | <p>Débit de 1,9 L.min⁻¹ D₅₀ = 4,04 µm (pente = 1,22); BPC : 58%</p> <p>Carte de biais >±10% : - MMAD ≥ 7 (GSD =2) - MMAD ≥ 9 (GSD = 2,25) - MMAD ≥ 11 (GSD = 2,5) - MMAD ≥ 14 (GSD = 2,75) - MMAD ≥ 18 (GSD = 3) - MMAD ≥ 23 (GSD = 3,25)</p> | |
| Lee <i>et al.</i> 2010 | entrée du dispositif perpendiculaire au flux d'air orientation à 0° | air calme | FSP 10 | <p>Détermination graphique à partir des courbes d'efficacité</p> <p>Débit optimisé de 11,2 L.min⁻¹ D₅₀ = 4,2 µm; 1 µm : E = 100%, B = 3% 2 µm : E = 100%, B = 9%</p> | => restriction aérosol de diamètre supérieur à 7,5 µm peu dispersé |

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Dispositifs testés | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------|--|------------------------------|
| | | | | <p>3 µm : E = 95%, B = 29%</p> <p>4 µm : E = 82%, B = 64%</p> <p>5 µm : E = 40%, B = 33%</p> <p>6 µm : E = 10%, B = -40%</p> <p>7 µm : E = 5%, B = -45%</p> <p>8 µm : E = 2%, B = -58%</p> <p>9 µm : E = 2%, B = -21%</p> <p>10 µm : E = 2%, B = 48%</p> <p>Débit de 10 L.min⁻¹ D₅₀ = 4,8 µm;</p> <p>1,5 µm : E = 102%, B = 7%</p> <p>2 µm : E = 100%, B = 9%</p> <p>3 µm : E = 90%, B = 22%</p> <p>4 µm : E = 60%, B = 20%</p> <p>5 µm : E = 17%, B = -43%</p> <p>6 µm : E = 5%, B = -70%</p> <p>7 µm : E = 2%, B = -78%</p> <p>8 µm : E = 1%, B = -79%</p> <p>9 µm : E = 0%, B = -100%</p> <p>10 µm : E = 0%, B = -100%</p> <p>Carte de biais > ±20% : MMAD [1- 7] µm et GSD [1,5 - 3,5] MMAD [7-25] µm et GSD >2</p> | |
| SKC Notice (2018) | NR | NR | cyclone SKC plastique | <p>Débit optimisé de 3 L.min⁻¹ D₅₀ = 4,20 µm (SD= 0,09)</p> <p>Carte de biais >±10% :</p> <ul style="list-style-type: none"> - MMAD [14-15] µm (GSD =2) - MMAD [16-17] µm (GSD = 2,25) - MMAD [19-20] µm (GSD = 2,5) - MMAD = 24 µm (GSD = 2,75) - MMAD ≥ 18 (GSD = 3) - MMAD ≥ 23 (GSD = 3,25) | |

Annexe 3.6 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des cyclones GK avec la convention alvéolaire

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Dispositifs testés | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|------------------------|---|-------------------------------|--------------------|---|------------------------------|
| Kenny & Gussman (1997) | entrée du dispositif perpendiculaire au flux d'air orientation à 0° | NR | Cyclone GK 1.52 | Débit optimisé de 1,51 L.min ⁻¹ pour D ₅₀ = 4 µm | |
| | | | Cyclone GK 2.69 | Débit optimisé de 4,41 L.min ⁻¹ pour D ₅₀ = 4 µm Détermination graphique à partir des courbes d'efficacité Biais pour le débit de 4,2 L.min ⁻¹ 1 µm : E = 100%, B = 3% 2 µm : E = 98%, B = 7% 3 µm : E = 92%, B = 25% 4 µm : E = 56%, B = 12% 5 µm : E = 22%, B = -27% 6 µm : E = 8%, B = -52% 7 µm : E = 4%, B = -56% 8 µm : E = 2%, B = -58% Carte de biais >±10% MMAD [7,5 -25] (GSD croissant de 1,5 à 2,75) | |
| | | | Cyclone GK 3.45 | Débit optimisé de 7,03 L.min ⁻¹ pour D ₅₀ = 4 µm | |
| Lee et al. 2010 | entrée du dispositif perpendiculaire au flux d'air orientation à 0° | air calme | GK 2.69 | Détermination graphique à partir des courbes d'efficacité Débit optimisé de 4,4 L.min⁻¹ D ₅₀ = 4,2 µm; 1,6 µm : E = 104%, B = 10% 2 µm : E = 95%, B = 4% 3 µm : E = 85%, B = 15% 4 µm : E = 48%, B = -4% 5 µm : E = 24%, B = -20% 6 µm : E = 15%, B = -11% 7 µm : E = 8%, B = -12% 8 µm : E = 4%, B = -17% 9 µm : E = 2%, B = -21% 10 µm : E = 1%, B = -26% Débit de 4,2 L.min ⁻¹ D ₅₀ = 4,8 µm; 1,3 µm : E = 99%, B = 3% 2 µm : E = 99%, B = 8% 3 µm : E = 92%, B = 25% 4 µm : E = 50%, B = 0% 5 µm : E = 26%, B = -13% 6 µm : E = 17%, B = 1% 7 µm : E = 13%, B = 44% 8 µm : E = 10%, B = 108% 9 µm : E = 10%, B = 293% 10 µm : E = 10%, B = 642% Carte de biais > ±20% : MMAD > 2,5 µm et GSD ≥ 1,5 | |
| HSL (2011) | | | GK 4.162 | Débit de 7 L.min ⁻¹ : D ₅₀ = 4,89 µm (SD=0,012) | |

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Dispositifs testés | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------|-------------|-------------------------------|--------------------|--|------------------------------|
| | | | | <p>Carte de biais >±10%</p> <p>MMAD [2 -12] (GSD=1,75) MMAD [2 -15] (GSD=2) MMAD [2 -17] (GSD=2,25) MMAD [2 -20] (GSD=2,5) MMAD [2 -24] (GSD=2,75) MMAD [2 -27] (GSD=3) MMAD [1 -30] (GSD=3,25) MMAD [1-28] (GSD=3,5) MMAD [1 -26] (GSD=3,75) MMAD [1 -25] (GSD=4)</p> <p>Débit de 8 L.min⁻¹ : D₅₀ = 4,34 µm (SD=0,06)</p> <p>Carte de biais >±10%</p> <p>MMAD [3 -9] (GSD=1,75) MMAD [3 -15] (GSD=2) MMAD [3 -17] (GSD=2,25) MMAD [4 -20] (GSD=2,5) MMAD [4 -24] (GSD=2,75) MMAD [5 -27] (GSD=3) MMAD [5 -30] (GSD=3,25) MMAD [6 -28] (GSD=3,5) MMAD [7 -26] (GSD=3,75) MMAD [8 -25] (GSD=4)</p> <p>Débit optimisé de 8,5 L.min⁻¹ : D₅₀ = 4,09 µm (SD=0,08)</p> <p>Carte de biais <±10%</p> <p>Débit de 9 L.min⁻¹ : D₅₀ = 3,91 µm (SD=0,07)</p> <p>Carte de biais >±10%</p> <p>MMAD [9 -12] (GSD=1,75) MMAD [14 -15] (GSD=2)</p> <p>Débit de 9,5 L.min⁻¹ : D₅₀ = 3,67 µm (SD=0,03)</p> <p>Carte de biais >±10%</p> <p>MMAD [6 -11] (GSD=1,75) MMAD [8 -15] (GSD=2) MMAD [11 -17] (GSD=2,25) MMAD [16 -20] (GSD=2,5) MMAD [22 -24] (GSD=2,75)</p> <p>Débit de 10 L.min⁻¹ : D₅₀ = 3,47 µm (SD=0,05)</p> <p>Carte de biais >±10%</p> <p>MMAD [5 -12] (GSD=1,75) MMAD [7 -15] (GSD=2) MMAD [9 -17] (GSD=2,25) MMAD [11 -20] (GSD=2,5)</p> | |

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Dispositifs testés | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-------------------------|-------------|-------------------------------|--------------------|--|------------------------------|
| | | | | MMAD [15 -24] (GSD=2,75) MMAD [19 -27] (GSD=3) MMAD [25 -30] (GSD=3,25) | |
| Metropol Cyclone (2019) | NR | NR | GK 2.69 | Détermination graphique à partir des courbes d'efficacité Biais pour le débit de 4,2 L.min ⁻¹ : 1 µm : E = 100%, B = 3% 2 µm : E = 102%, B = 12% 3 µm : E = 90%, B = 22% 4 µm : E = 45%, B = -10% 5 µm : E = 28%, B = -7% 6 µm : E = 17%, B = 1% 7 µm : E = 5%, B = -45% 8 µm : E = 2%, B = -58% Carte de biais >±10% MMAD [6 -9] (GSD croissant de 1,2 à 1,8) | |

Annexe 3.7 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du CIP 10-R avec la convention alvéolaire

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|------------------------------|--|-------------------------------|--|---|
| Courbon <i>et al.</i> , 1988 | NR | NR | <p>Différence d'efficacité de pénétration déterminée à partir des courbes d'efficacité :</p> <ul style="list-style-type: none"> Coal dust + Foam grade 60 <ul style="list-style-type: none"> 1,4 µm : E = 60%, B = -37% 1,8 µm : E = 65%, B = -30% 2,4 µm : E = 68%, B = -21% 3,6 µm : E = 55%, B = -8% 4 µm : E = 30%, B = -40% 4,8 µm : E = 18%, B = -46% 6 µm : E = 5%, B = -70% 9 µm : E = 2%, B = -21% Aloxite 50 + Foam grade 60 <ul style="list-style-type: none"> 1,4 µm : E = 70%, B = -27% 1,8 µm : E = 80%, B = -14% 2,4 µm : E = 90%, B = 5% 3,6 µm : E = 83%, B = 40% 4 µm : E = 40%, B = -20% 4,8 µm : E = 18%, B = -46% 6 µm : E = 5%, B = -70% 9 µm : E = 2%, B = -21% | |
| Görner <i>et al.</i> , 2001 | NR | 0,15 | <p>Débit de 10 L.min⁻¹ D₅₀ = 4,26 µm (pente = 1,43); BPC = 81% Carte de biais >±10% : - MMAD ≤ 2 (GSD = 2) - MMAD ≤ 3 (GSD ≥ 2,25) - MMAD ≤ 4 (GSD ≥ 2,75) - MMAD ≤ 6 (GSD ≥ 3) - MMAD ≤ 7 (GSD ≥ 3,25) - MMAD ≤ 9 (GSD = 3,5)</p> | => restriction aérosols DE FAIBLES GRANULOMETRIES : MMAD ≤ 2 µm et 9 µm très dispersés |
| Lee <i>et al.</i> 2010 | Entrée du dispositif parallèle au flux d'air | air calme | <p>D₅₀ = 4,7 µm Différence d'efficacité de pénétration déterminée à partir des courbes d'efficacité :</p> <ul style="list-style-type: none"> 1,4 µm : E = 70%, B = -27% 2 µm : E = 80%, B = -12% 2,5 µm : E = 85%, B = 1% 3 µm : E = 90%, B = +22% 3,4 µm : E = 78%, B = +21% 4 µm : E = 60%, B = +20% 5 µm : E = 48%, B = +60% 6 µm : E = 35%, B = +109% 7 µm : E = 20%, B = +121% 8,5 µm : E = 8%, B = +129% 9 µm : E = 5%, B = +97% <p>- Carte de biais >+20% : MMAD > 3 GSD 1,5 MMAD > 5 GSD 2 MMAD > 7,5 GSD 2,5 MMAD > 10 GSD 3 MMAD > 15 GSD 3,5</p> | <p>Sous estimation pour les diamètres de 1 à 2,5 µm Surestimation pour les particules de diamètres > 2,5 µm</p> |
| Metropol CIP 10 (2016) | NR | NR | <p>Détermination graphique à partir des courbes d'efficacité Biais pour le débit de 10 L.min⁻¹ : 1 µm : E = 60%, B = -38% 1,5 µm : E = 78%, B = -18%</p> | => restriction aérosols DE FAIBLES GRANULOMETRIES : MMAD ≤ 2 µm et 9 µm très dispersés |

| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention | Informations complémentaires |
|-----------|-------------|----------------------------------|---|---------------------------------|
| | | | 2 µm : E = 87%, B = -5% 3 µm : E = 80%, B = 8% 4 µm : E = 57%, B = 14% 5 µm : E = 33%, B = 10% 6 µm : E = 17%, B = 1% 7 µm : E = 9%, B = -1% 8 µm : E = 5%, B = 4% 9 µm : E = 2%, B = -21% 10 µm : E = 1%, B = -26% | |

Annexe 3.8 : Autres études comparant les mesures réalisées avec différents dispositifs de la fraction alvéolaire

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires | | |
|-------------------------|--|---|--|------------------------------|------------------|---|
| Tsai <i>et al.</i> 1999 | Etude expérimentale comparant 2 dispositifs (cyclone DO et cyclone AI) | 10 mm nylon (cyclone DO) 18 mm AI (cyclone AI) | Sampling accuracy Φ Précision faible pour des diamètres < 6 μm et peu dispersé pour les 2 dispositifs. Meilleure performance pour cyclone AI vs DO | | | |
| Lee <i>et al.</i> 2010 | Comparaison entre différents dispositifs : CIP-10R ; GK 2.69 et FSP 10 comparé au Cyclone DO et HD | CIP 10-R | Type de poussière F800 | | | Résultats proches entre GK 2.69 et HD notamment pour les particules de diamètre inférieur à 6 μm . Augmentation du débit pourrait permettre d'améliorer les performances |
| | | | | Ratio CIP-10R/DO | Ratio CIP-10R/HD | |
| | | | en concentration | 1,52 \pm 0,24 | 1,26 \pm 0,09 | |
| | | | en masse nette | 8,89 \pm 1,41 | 5,77 \pm 0,46 | |
| | | | Type de poussière F1200 | | | |
| | | | | Ratio CIP-10R/DO | Ratio CIP-10R/HD | |
| | | | en concentration | 1,21 \pm 0,11 | 0,91 \pm 0,08 | |
| | | | en masse nette : | 5,77 \pm 0,46 | 4,16 \pm 0,45 | |
| | | | AC fine dust | | | |
| | | | | Ratio CIP-10R/DO | Ratio CIP-10R/HD | |
| | | | en concentration | 0,89 \pm 0,10 | 0,76 \pm 0,05 | |
| | | | en masse nette : | 5,24 \pm 0,58 | 3,45 \pm 0,26 | |
| | | GK 2.69 | Type de poussière F800 | | | |
| | | | | Ratio GK 2.69/DO | Ratio GK 2.69/HD | |
| | | | en concentration : | 1,38 \pm 0,08 | 1,15 \pm 0,11 | |
| | | | en masse nette : | 3,41 \pm 0,21 | 2,22 \pm 0,17 | |
| | | | Type de poussière F1200 | | | |
| | | | | Ratio GK 2.69/DO | Ratio GK 2.69/HD | |
| | | | en concentration : | 1,28 \pm 0,06 | 0,97 \pm 0,02 | |
| | | | en masse nette : | 3,13 \pm 0,14 | 1,84 \pm 0,06 | |
| | | | AC fine dust | | | |
| | | | | Ratio GK 2.69/DO | Ratio GK 2.69/HD | |
| | | | en concentration : | 1,12 \pm 0,05 | 0,95 \pm 0,01 | |
| | | | en masse nette : | 2,73 \pm 0,12 | 1,80 \pm 0,53 | |
| FSP 10 | Type de poussière F800 | | | | | |
| | | Ratio FSP 10/DO | Ratio FSP 10/HD | | | |
| | en concentration : | 1,85 \pm 0,11 | 1,54 \pm 0,13 | | | |
| | en masse nette : | 10,76 \pm 0,60 | 7,04 \pm 0,54 | | | |
| | Type de poussière F1200 | | | | | |
| | | Ratio FSP 10/DO | Ratio FSP 10/HD | | | |
| | en concentration : | 1,50 \pm 0,07 | 1,14 \pm 0,05 | | | |
| | en masse nette : | 8,51 \pm 0,38 | 4,98 \pm 0,25 | | | |
| | AC fine dust | | | | | |
| | | Ratio FSP 10/DO | Ratio FSP 10/HD | | | |
| | en concentration | 1,17 \pm 0,06 | 0,99 \pm 0,01 | | | |
| | en masse nette : | 6,85 \pm 0,37 | 4,52 \pm 0,09 | | | |

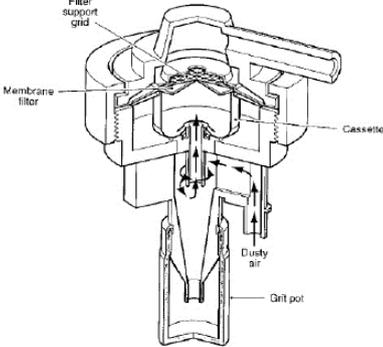
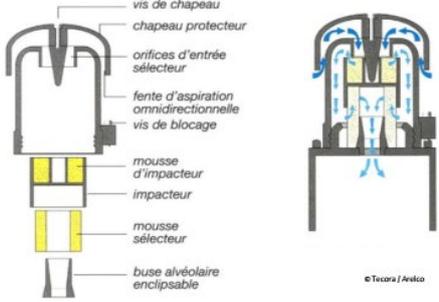
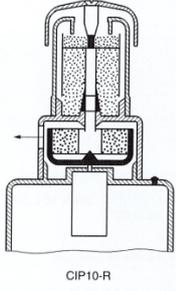
| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires |
|--------------------------|---|---|--|--|
| Verpaele & Jouret (2013) | Etude de terrain sur la mesure d'atmosphères de travail. 6 types de dispositif de prélèvement différents. Mesure par 2 préleveurs sur 7 sites. 8 par jour pendant 2 jours dans chaque industrie | Cyclone DO | <p>Relation linéaire Concentration DO = a Concentration médiane + b Pente = 0,90 ($r^2 = 0,96$)</p> <p>Concentration mesurée par le dispositif Cyclone DO est proche de la concentration médiane issue des différentes mesures sur les sites.</p> <p>Différence significative entre le dispositif SKC PVC et DO ($p < 10^{-3}$) pour les mesures dans l'industrie de briques</p> | |
| | | CIP 10 | <p>Relation linéaire Concentration CIP10 = a Concentration médiane + b Pente = 0,74 ($r^2 = 0,92$)</p> <p>Pas de différences significatives avec les dispositifs cyclones étudiés (SIMPEDS, BCIRA – cyclone HD et cyclone DO)</p> | Performances les plus faibles attendues mais non observées |
| | | SKC filtre PVC, SKC filtre polycarbonate, BCIRA, SIMPEDS (Cyclone HD) | <p>Relation linéaire Concentration SKC PC = a Concentration médiane + b Pente = 1,52 ($r^2 = 0,90$)</p> <p>Relation linéaire Concentration SKC PVC = a Concentration médiane + b Pente = 1,35 ($r^2 = 0,84$)</p> <p>Relation linéaire Concentration SIMPEDS = a Concentration médiane + b Pente = 1,14 ($r^2 = 0,98$)</p> <p>Différence significative entre les différents dispositifs ($p = 0,014$) SKC PVC et BCIRA, SIMPEDS pour les mesures dans l'industrie de sable</p> <p>Différence significative entre les différents dispositifs ($p < 10^{-4}$) SKC PVC et BCIRA, SIMPEDS pour les mesures dans l'industrie de briques</p> | |
| Hu <i>et al.</i> 2014 | Analyse des blancs et effets charges électrostatiques pour chaque dispositif | FSP 2 | <p>Pas de différence significative de l'effet électrostatique après prise en compte des blancs 1,04 ± 0,63 sans neutralisation 1,04 ± 0,71 avec neutralisation</p> <p>Sur les échantillons de terrain, différence significative après prise en compte des blancs : Variation de concentration : -24,3% et -22,5%</p> | |
| | | FSP 10 | <p>Pas de différence significative de l'effet électrostatique après prise en compte des blancs 1,09 ± 0,51 sans neutralisation 1,07 ± 0,52 avec neutralisation"</p> <p>Sur les échantillons de terrain, différence significative après prise en compte des blancs sur un des sites: Variation de concentration : -8,6%</p> | |

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires | |
|------------------------|---|---|--|------------------------------|--------------------|
| Soo <i>et al.</i> 2014 | Etude expérimentale sur la mesure par différents cyclones et en fonction du type de cassette assemblée (polystyrène ou polypropylène) | 10 mm nylon (Cyclone DO) Cyclone AI BGI4L (Cyclone HD) GK 2.69 (Cyclone GK) | Dépôt sur les parois – fraction en masse de quartz : Différence significative - cassette polystyrène > cassette polypropylène non conducteur | | |
| Lee <i>et al.</i> 2016 | Comparaison avec autre dispositif par paire : CIP-10R, GK2.69 et FSP 10 comparé au Cyclone DO ou HD | CIP10 | Avec valeurs extrêmes (<0,3 et >3) | | |
| | | | | Ratio CIP-10R/DO | Ratio CIP -10R /HD |
| | | | en concentration | 2,2 | 1,1 |
| | | | en masse nette : | 13 | 4,8 |
| | | | Sans valeurs extrêmes (]0,3-3[) | | |
| | | | | Ratio CIP-10R/DO | Ratio CIP -10R /HD |
| | | | en concentration | 1,2 | 0,7 |
| | | | en masse nette : | 6,8 | 4,0 |
| | | | Différence significative sur masse en GM net mass ratio : CIP10 > 10 mm DO Différence significative pour net mass ratio : CIP 10 < HD Quantité plus élevée prélevée que les dispositifs à faible débit : 5,9 /DO et 4,7 /HD | | |
| | | GK 2.69 | Avec valeurs extrêmes (<0,3 et >3) | | |
| | | | | Ratio GK2.69/DO | Ratio GK2.69/HD |
| | | | en concentration | 1,3 | 0,5 |
| | | | en masse nette : | 3,6 | 1 |
| | | | Sans valeurs extrêmes (]0,3-3[) | | |
| | | | | Ratio GK2.69/DO | Ratio GK2.69/HD |
| | | | en concentration | 1,2 | 1,05 |
| | | | en masse nette : | 2,8 | 2 |
| | | | Différence significative pour net mass ratio : GK2.69 > 10 mm DO Différence significative sur masse en GM : GK2,69< HD Quantité plus élevée prélevée que les dispositifs à faible débit lorsque les outliers sont écartés : 2,6/ Do et 2 /HD | | |
| FSP 10 | Avec valeurs extrêmes (<0,3 et >3) | | | | |
| | | Ratio FSP 10/DO | Ratio FSP 10/HD | | |
| | en concentration | 1,45 | 0,8 | | |
| | en masse nette : | 9 | 4,3 | | |
| | Sans valeurs extrêmes (]0,3-3[) | | | | |
| | | Ratio FSP 10/DO | Ratio FSP 10/HD | | |
| | en concentration | 1,2 | 1,1 | | |
| | en masse nette : | 6,7 | 5,3 | | |

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires |
|--------------------|--|-------------|---|--|
| | | | <p>Différence significative sur masse en GM net mass ratio : FSP10 > 10 mm DO</p> <p>Différence significative pour net mass ratio : FSP 10 < HD</p> <p>Quantité plus élevée prélevée que les dispositifs à faible débit : 6,6/Do et 5,1 / HD</p> | |
| Stacey et al. 2014 | Comparaison de 3 dispositifs (CIP10-R, FSP 10 et GK2.69) au cyclone HD SIMPEDS | SIMPEDS | <p>Relation linéaire</p> <ul style="list-style-type: none"> ultrafine ARD ; 0-10 µm ; MMAD= 2,8 µm : Pente : 1,04 [1,01 -1,06] medium ARS ; 0-80 µm ; MMAD= 4,6 µm : Pente : 1,05 [1,02 -1,07] | Résultats comparables avec le dispositif de référence SIMPEDS |
| | | GK 2.69 | <p>Débit 4,2 L.min⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> ultrafine ARD ; 0-10 µm ; MMAD= 2,8 µm : Pente : 0,95 [0,93 -0,98] medium ARS ; 0-80 µm ; MMAD= 4,6 µm : Pente : 0,87 [0,85 -0,88] Coefficient regression SIMPEDS = a GK2.69 : 0,852 (r² = 0,793) Relative difference with cyclone DO: 1,01 <p>Débit 4,4 L.min⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> ultrafine ARD ; 0-10 µm ; MMAD= 2,8 µm : Pente : 0,92 [0,90 -0,94] medium ARS ; 0-80 µm ; MMAD= 4,6 µm : Pente : 0,87 [0,84 -0,94] Coefficient regression SIMPEDS = a GK2.69 : 0,836 (r² = 0,991) Relative difference with cyclone DO: 1,01 | |
| | | FSP 10 | <p>Débit 10 L.min⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> ultrafine ARD ; 0-10 µm ; MMAD= 2,8 µm : Pente : 1,11 [1,09 -1,14] medium ARS ; 0-80 µm ; MMAD= 4,6 µm : Pente : 1,12 [1,09 -1,15] Coefficient regression SIMPEDS = a FSP 10 : 1,04 (r² = 0,996) Relative difference with cyclone DO: 1,26 <p>Débit 11,2 L.min⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> ultrafine ARD ; 0-10 µm ; MMAD= 2,8 µm : Pente : 1,04 [1,02 – 1,07] medium ARS ; 0-80 µm ; MMAD= 4,6 µm : Pente : 1,06 [1,03 -1,09] Coefficient regression SIMPEDS = a FSP 10 : 0,997 (r² = 0,997) Relative difference with cyclone DO: 1,21 | Débit de 11,2 L.min ⁻¹ amène une meilleure comparabilité des résultats avec le dispositif de référence SIMPEDS |
| | | CIP 10 | <ul style="list-style-type: none"> ultrafine ARD ; 0-10 µm ; MMAD= 2,8 µm : Pente : 0,86 [0,78 – 0,93] medium ARS ; 0-80 µm ; MMAD= 4,6 µm : Pente : 0,95 [0,91 -0,99] Coefficient regression SIMPEDS = a CIP 10 : 0,836 (r² = 0,950) Relative difference with cyclone DO: 1,01 | Résultats comparables en Moyenne mais écarts de 20% sur les particules de petite taille <i>Relation linéaire (all data)</i> Pente = 1,031 (r ² = 0,9976) |

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats | Informations complémentaires |
|--------------------|--|-------------|---|--|
| Stacey et al. 2016 | Comparaison de 3 dispositifs (GK 4.162, GK 2.69, FSP 10 et PPI8) au cyclone HD SIMPEDS | GK4.162 | <p>Average ratio of concentrations dispositif /SIMPEDS: 1,06</p> <ul style="list-style-type: none"> coal dust ; $\rho = 1,5 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 7,62 μm (GSD = 1,61): ratio = 1,09 Mullite dust; $\rho = 2,6 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 14,9 μm (GSD = 1,9): ratio = 1,05 arizona road dust (ARD); $\rho = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 17,4 μm (GSD = 1,86): ratio = 1,05 arizona road dust (ARD); $\rho = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 22 μm (GSD = 1,98): ratio = 1,03 <p>Relation linéaire (all data) Pente = 1,031 ($r^2 = 0,9976$)</p> | Performances avec l'accord le plus proche du cyclone SIMPEDS en terme de précision |
| | | GK 2.69 | <p>Average ratio of concentrations dispositif /SIMPEDS: 1,00</p> <ul style="list-style-type: none"> coal dust ; $\rho = 1,5 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 7,62 μm (GSD = 1,61): ratio = 1,00 Mullite dust; $\rho = 2,6 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 14,9 μm (GSD = 1,9): ratio = 0,98 arizona road dust (ARD); $\rho = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 17,4 μm (GSD = 1,86): ratio = 0,99 arizona road dust (ARD); $\rho = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 22 μm (GSD = 1,98): ratio = 1,02 <p>Relation linéaire (all data) Pente = 0,9527 ($r^2 = 0,9914$)</p> | |
| | | FSP 10 | <p>Average ratio of concentrations dispositif /SIMPEDS: 1,14</p> <ul style="list-style-type: none"> coal dust ; $\rho = 1,5 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 7,62 μm (GSD = 1,61): ratio = 1,17 Mullite dust; $\rho = 2,6 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 14,9 μm (GSD = 1,9): ratio = 1,16 arizona road dust (ARD); $\rho = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 17,4 μm (GSD = 1,86): ratio = 0,97 arizona road dust (ARD); $\rho = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 22 μm (GSD = 1,98): ratio = 1,09 <p>Relation linéaire (all data) Pente = 1,0801 ($r^2 = 0,9881$)</p> | |
| | | PPI8 | <p>Average ratio of concentrations dispositif /SIMPEDS: 1,03</p> <ul style="list-style-type: none"> coal dust ; $\rho = 1,5 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 7,62 μm (GSD = 1,61): ratio = 1,06 Mullite dust; $\rho = 2,6 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 14,9 μm (GSD = 1,9): ratio = 1,07 arizona road dust (ARD); $\rho = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 17,4 μm (GSD = 1,86): ratio = 0,97 arizona road dust (ARD); $\rho = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$; MMAD = 22 μm (GSD = 1,98): ratio = 1,09 <p>Relation linéaire (all data) Pente = 0,9097 ($r^2 = 0,9797$)</p> | |

Annexe 3.9 : Illustration des différents dispositifs de prélèvement de la fraction alvéolaire

| | | | |
|--|-----------------------------------|---|---|
|  <p>Source : Metropol Cyclone</p> | <p>Dorr-Oliver cyclone</p> |  | <p>cyclone GS « Multi-inlet cyclone »</p> |
|  | <p>Dust cyclone</p> |  | <p>FSP 10 cyclone</p> |
| <p>Source : Metropol Cyclone (2019)</p> | | <p>Lee <i>et al.</i> (2010)</p> | |
|  | |  | <p>Higgins Dewell cyclone</p> |
| <p>source : HSE MDHS 14-4, Metropol Cyclone</p> | | | |
|  <p>GK 2.69</p> | <p>GK cyclone</p> |  | <p>Adapted filter cassette GK 4.162 cyclone</p> |
| <p>Metropol Cyclone (2019)</p> | | <p>Source : HSL 2011 ; Metropol Cyclone (2019)</p> | |
|  <p>(a) alvéolaire</p> | |  <p>CIP10-R</p> | <p>CIP 10-R</p> |
| <p>Source : Norme NF X 43-262, Métropol CIP 10 (2016)</p> | | | |

Annexe 4 : Données issues de la littérature relatives aux dispositifs de prélèvement simultané individuel des fractions inhalable et alvéolaire

Annexe 4.1 : Descriptif des études identifiées de comparaison entre différents dispositifs de prélèvement simultané des fractions inhalable et alvéolaire

| Référence | Type d'étude | Dispositifs testés ^a | Objectifs et conditions de l'étude |
|--|---|--|---|
| Kenny <i>et al.</i> (2001) | Comparaison entre différents dispositifs : IOM dual fraction et personal cyclones | Dual fraction dust sampler (IOM Multidust) | <p>Etude de terrain comparant les concentrations mesurées par les différents dispositifs : IOM Multidust vs cyclone HD</p> <p>Prélèvement de terrain dans différents secteurs industriels</p> <ul style="list-style-type: none"> Débit testé : <p>IOM dual fraction : 2 L.min⁻¹ cyclones (MDHS 14/2) : 2,2 L.min⁻¹</p> |
| Tatum <i>et al.</i> (2002) | Comparaison entre différents dispositifs : Respicon vs BGI-4 cyclone | Respicon (Impacteur) | <p>Etude de terrain comparant les concentrations mesurées par les différents dispositifs : Respicon vs BGI-4 cyclone (cyclone HD)</p> <p>Prélèvement de terrain dans l'industrie notamment du bois (Plywood industry; Particle Board industry ; Door siding industry; OSB industry)</p> <ul style="list-style-type: none"> Débit testé : <p>Respicon (impacteur) : 3,11 L.min⁻¹ BGI-4 (cyclone HD) : 2,2 L.min⁻¹</p> |
| Singh <i>et al.</i> (2003) | Comparaison des dispositifs PCIS et MOUDI | MOUDI Impacteur PCIS - miniaturized impactor at 4 stages (Impacteur) | <p>Etude expérimentale et de terrain comparant les concentrations obtenues par les 2 dispositifs</p> <p>Tunnel (1,6 x 1,6 m²) à vitesse d'air 3-8 km.h⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> Génération d'un aérosol monodispersé - Dae = [2-10] µm + Prélèvements de terrain dans l'air extérieur Débit testé : <p>PCIS (impacteur) : 9 L.min⁻¹ MOUDI (impacteur) : 30 L.min⁻¹</p> |
| Teikari <i>et al.</i> (2003) | Comparaison de 3 dispositifs avec modified IOM sampler | Two-stage cascade impactor PM10/4 (impacteur) Respicon (Impacteur) Grimm Monitor Mesure directe Modified IOM foam sampler | <p>Etude expérimentale et de terrain comparant les concentrations obtenues par les différents dispositifs avec celles de l'IOM modifié</p> <p>Chambre expérimentale de 143 m³ à vitesse d'air 0,1 m.s⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> Génération d'un aérosol Fine quartz aerosol + Prélèvements de terrain dans une production de talc <p>Débit du fabricant testé sans plus de précision</p> |
| Rando et al (2005) Soutien de l'association "American | Comparaison entre différents dispositifs : Respicon vs SKC Al cyclone | Respicon (Impacteur) | <p>Etude de terrain comparant les concentrations mesurées par les différents dispositifs : Respicon vs BGI-4 cyclone (cyclone HD)</p> <p>Prélèvement de terrain dans l'industrie notamment du bois</p> <ul style="list-style-type: none"> Débit testé : |

| Référence | Type d'étude | Dispositifs testés ^a | Objectifs et conditions de l'étude |
|---|--|---|--|
| forest and paper association ^b | | | Respicon (impacteur) : 3,1 L.min ⁻¹ SKC AI cyclone (AI cyclone) : 2,5 L.min ⁻¹ |
| Wu & Vincent (2007) | Comparaison entre différents dispositifs : Modified marple impactor et IOM dual fraction | Modified Marple cascade impactor (impacteur) IOM Dual fraction | Etude expérimentale en laboratoire avec un système rotatif – courbe empirique d'efficacité en fonction du Dae Chambre expérimentale de 1 m ³ à vitesse d'air calme sans plus de précision Génération de 6 types d'aérosol à partir de poudre (fused alumina) |
| Linnainmaa et al. (2008) | Comparaison de 3 dispositifs avec modified IOM sampler | Two-stage cascade impactor PM10/4 (impacteur) Grimm Monitor Mesure directe Modified IOM foam sampler | Etude expérimentale et de terrain comparant les concentrations obtenues par les différents dispositifs Chambre expérimentale de 143 m ³ à vitesse d'air 0,1 m.s ⁻¹ <ul style="list-style-type: none"> Génération d'un aérosol monodispersé - spheric polystyrene particules (Dae = 1,1 ou 2,5 ou 4 ou 7 µm) ρ = 1,05 g.cm⁻³ + Prélèvements de terrain dans différents secteurs industriels Débit testé : Two-stage cascade impactor PM10/4 (impacteur) : 10 L.min ⁻¹ |

^a les dispositifs de prélèvement notés en gras correspondent à des dispositifs de prélèvement individuels et commercialisés (les autres dispositifs permettent de réaliser des mesures à poste fixe ou bien sont particuliers et non commercialisés).

Annexe 4.2 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement de l'IOM Dual Fraction avec les conventions inhalable et alvéolaire

Aucune étude de comparaison du dispositif IOM Dual fraction avec les fractions conventionnelles n'a été identifiée. Seule des études comparant le dispositif modifié pour la mesure de la fraction inhalable et alvéolaire a été comparé avec d'autres dispositifs et sont détaillés dans l'annexe 4.5.

Annexe 4.3 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement du CIS multi-fraction respirable avec les conventions inhalable et alvéolaire

Aucune étude de comparaison du dispositif CIS multi-fraction respirable sampler avec la fraction conventionnelle n'a été identifiée ni d'études comparant le dispositif avec d'autres dispositifs.

Annexe 4.4 : Comparaison de l'efficacité de prélèvement des impacteurs avec les conventions inhalable et alvéolaire

Seul le Respicon a fait l'objet d'une étude de comparaison avec la fraction conventionnelle inhalable ou alvéolaire, présentée dans le tableau ci-dessous.

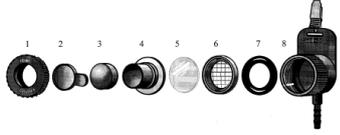
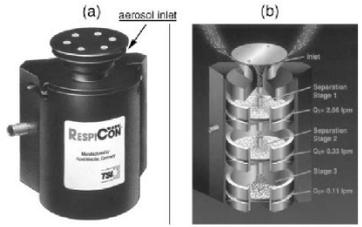
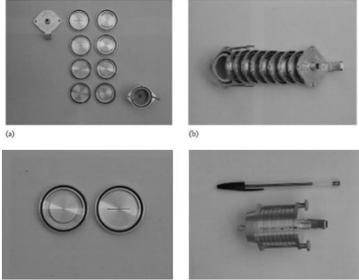
| Référence | Orientation | Vit. air (m.s ⁻¹) | Écart à la convention inhalable | Écart à la convention alvéolaire |
|-------------------------|--|-------------------------------|---|---|
| Li <i>et al.</i> , 2000 | Entrée multidirectionnelle, positionnée vers le haut | 0,55 | Détermination graphique Pertes : sur la tête d'entrée : 0% à 2 µm, environ 1% pour 5, 10 et 20 µm, 2,5% pour 40 µm, 1 à 4% pour 68 µm Sur-échantillonnage 2 µm : E = 95%, B = + 1% 5 µm : E = 80%, B = -8% 10 µm : E = 85 à 90%, B = + 10 à + 16% 20 µm E = 58 à 65%, B = -8 à -11% 40 µm E = 500%, B = -8% 68 µm : E = 50 à 57%, B = 0 à +12 % ⇒ B = - 8 à +1% (2-5 µm), + 10 à +16 (10 µm), - 11 à +12% (20 à 68 µm) | Détermination graphique à partir des courbes d'efficacité Biais pour le débit de 3,10 L.min ⁻¹ 1,6 µm : E = 86%, B = -9% 1,6 µm : E = 78%, B = -18% 5 µm : E = 34%, B = 13% 10 µm : E = 1%, B = -26% Perte de 18% pour le diamètre de 5 µm |
| | | 1,1 | Détermination graphique Pertes : Sur la tête d'entrée : 0% à 2 µm, environ 2% pour 5 et 10 µm, 2,5% pour 20 µm, 5 à 8% pour 40 µm, 1% pour 68 µm. 2 µm : E = 92 à 100%, B = - 2 à + 6% 5 µm : E = 78%, B = -10% 10 µm : E = 75%, B = -3% 20 µm E = 55%, B = -16% 40 µm E = 60 à 65%, B = +10 à +20% 68 µm : E = 70 à 80%, B = + 38 à +57 % ⇒ B = - 10 à + 6% (2 à 10 µm), -16 % (20 µm), +10 à +57% (40-68 µm) | Détermination graphique à partir des courbes d'efficacité Biais pour le débit de 3,10 L.min ⁻¹ 1,5 µm : E = 88%, B = -8% 1,5 µm : E = 80%, B = -16% 5 µm : E = 35%, B = 17% 10 µm : E = 8%, B = 493% Perte de 18% pour le diamètre de 5 µm |

Annexe 4.5 : Autres études comparant les mesures réalisées avec différents dispositifs d'échantillonnage simultané des fractions inhalable et alvéolaire

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats |
|----------------------------|--|---|--|
| Kenny <i>et al.</i> (2001) | Comparaison du dispositif IOM Dual fraction au cyclone HD | IOM Dual fraction | D50 varie de 3,8 à 5,3 μm . Diminution légère avec augmentation de la masse <ul style="list-style-type: none"> Relation linéaire Concentration IOM = alpha Concentration Cyclone: Pente = 0,93 ($r^2 = 0,8$) Ecart significatif avec un niveau de précision bas à des niveaux faibles (< 0,15 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). |
| Tatum <i>et al.</i> 2002 | Comparaison de 2 dispositifs : BGI-4 (cyclone HD) et Respicon (impacteur) | Respicon | Prélèvement de terrain dans l'industrie notamment du bois : <ul style="list-style-type: none"> 0,03 à 1,16 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 8 à 70% Plywood industry - Taille Particules collectées : < 4 μm : 70% ; 4-10 μm : 28% ; 10 - 100 μm : 2% ; >100 μm : 0% <ul style="list-style-type: none"> 0,19-0,27 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 12,5% 0,18-0,35 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 24,9% 0,02-0,06 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 38,5% 0,06-0,08 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 7,7% Particle Board industry <ul style="list-style-type: none"> 0,05-0,07 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 10,1% 0,14-0,20 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 15,3% Door siding industry <ul style="list-style-type: none"> 0,21-0,65 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 45,8% 0,32-2,53 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 69,5% OSB industry - Taille Particules collectées : < 4 μm : 90% ; 4-10 μm : 9% ; 10 - 100 μm : 1% ; >100 μm : 0% <ul style="list-style-type: none"> 0,06-0,17 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 47,2% 0,03-0,04 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; CV = 13,6% |
| Singh <i>et al.</i> 2003 | Comparaison entre 2 dispositifs : PCIS personal cascade impactor sampler et MOUDI | PCIS | Mesure des concentrations en $\text{PM}_{10-2,5}$: Relation linéaire Concentration PCIS = alpha Concentration MOUDI: 0,96 ($r^2=0,95$) |
| Teikari <i>et al.</i> 2003 | Comparaison de 3 dispositifs avec modified IOM sampler : modified IOM foam sampler; Two-stage cascade impactor PM10/4 ; Respicon ; Grimm monitor | Two-stage cascade impactor PM10/4 (impacteur) | % Concentration du dispositif par rapport à la concentration IOM foam et quantité prélevée en mg (erreur): <ul style="list-style-type: none"> Fine quartz aerosol - mineral : <ul style="list-style-type: none"> 145% ($\pm 50\%$) Prélèvements de terrain dans une production de talc - mineral : <ul style="list-style-type: none"> 230% (± 5) 0,18-1,76 mg (2-13%) |
| | | Respicon | <ul style="list-style-type: none"> Fine quartz aerosol - mineral : 125% ($\pm 60\%$) Prélèvements de terrain dans une production de talc - mineral : 100% (± 20) |
| Rando <i>et al.</i> 2005 | Comparaison de 2 dispositifs : SKC Al cyclone (cyclone Al) et Respicon (impacteur) | Respicon | Relation linéaire Concentration Respicon = alpha Concentration SKC Al: <ul style="list-style-type: none"> prélèvements de terrain dans l'industrie du bois : <ul style="list-style-type: none"> Pente = 1,24 (IC 1,03 - 1,44) overall geometric mean dust level (SD): 0,17 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (1,8) Ecart significatif avec un niveau de précision bas à des niveaux faibles (< 0,15 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) |

| Référence | Objectif de l'étude | Dispositifs | Résultats |
|-------------------------------|--|---|---|
| Wu & Vincent (2007) | Comparaison de 2 dispositifs : Modified marple impactor et IOM | Modified marple impactor (impacteur) | <p>Efficacité de collecte en fonction du type d'aérosole :</p> <ul style="list-style-type: none"> F 1200 ; MMAD = 6 μm (GSD = 1,36) : moy = 0 (SD = 0) F 800 ; MMAD = 13 μm (GSD = 1,30) : moy = 0,15 (SD = 0,01) F 400 ; MMAD = 34 μm (GSD = 1,20) : moy = 0,61 (SD = 0,03) F 320 ; MMAD = 58 μm (GSD = 1,17) : moy = 1,02 (SD = 0,06) F 280 ; MMAD = 74 μm (GSD = 1,19) : moy = 1,08 (SD = 0,10) F 240 ; MMAD = 89,5 μm (GSD = 1,29) : moy = 1,03 (SD = 0,12) <p>Comparaison à la fraction conventionnelle: Top : 29 μm Etage 1 : 21,3 μm Etage 2 : 14,8 μm Etage 3 : 9,8 μm Etage 4 : 6,0 μm Etage 5 : 3,5 μm Etage 6 : 1,55 μm Etage 7 : 0,93 μm Etage 8 : 0,52 μm</p> |
| Linnainmaa <i>et al.</i> 2008 | Comparaison de 3 dispositifs avec modified IOM sampler ; modified IOM foam sampler ; Two-stage cascade impactor PM10/4 ; Grimm monitor | Two-stage cascade impactor PM10/4 (impacteur) | <p>% Concentration du dispositif par rapport à la concentration IOM foam et quantité prélevée en mg (erreur):</p> <ul style="list-style-type: none"> monodisperse aerosol - spheric polystyrene particules (Dae = 1,1 ou 2,5 ou 4 ou 7 μm) ; $\rho = 1,05 \text{ g.cm}^{-3}$: <ul style="list-style-type: none"> 98% ($\pm 25\%$) Prélèvement sur le terrain dans différents secteurs industriels <ul style="list-style-type: none"> mineral : 300% ($\pm 180\%$) metal : 100% ($\pm 10\%$) |

Annexe 4.6 : Illustration des différents dispositifs de prélèvement simultané des fractions inhalable et alvéolaire

| | | | |
|---|--|---|----------------------------------|
|  <p>1: IOM body front part 2: Transport cover for cassette 3: Foam insert 4: Cassette front part 5: Filter 6: Cassette rear part 7: O-ring 8: IOM body rear part</p> | <p>IOM Dual-fraction foam sampler</p> |  <p>(a) aerosol inlet (b) Inlet Separation Stage 1 Cut-off 2.56 μm Separation Stage 2 Cut-off 4.22 μm Stage 3 Cut-off 6.11 μm</p> | <p>Respicon Impacteur</p> |
| <p>Source : Kenny <i>et al.</i> 2001</p> | | <p>(Li <i>et al.</i>, 2000)</p> | |
|  <p>(a) (b) (c) (d) Fig. 1. Pictures of the PCIS.</p> | <p>PCIS Impacteur</p> |  <p>FIGURE 2. The original Marple cascade impactor (left) modified-Marple cascade impactor (right)</p> | <p>Marple Impacteur</p> |
| <p>Singh <i>et al.</i> (2003)</p> | | <p>Source : Wu & Vincent (2007)</p> | |

Annexe 5 : Consultation publique

Aucun commentaire n'a été reçu lors de la phase de consultation publique qui s'est déroulée du 07/05/2020 au 05/06/2020.



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
F94701 Maisons-Alfort cedex
www.anses.fr
[@Anses_fr](https://twitter.com/Anses_fr)