

Notes techniques

MESURE DE L'EXPOSITION AUX AÉROSOLS EN FRACTION INHALABLE : AVANTAGES ET LIMITES DE LA « CASSETTE FERMÉE »

Comme tous les dispositifs de prélèvement, la « cassette fermée », largement utilisée pour mesurer l'exposition des travailleurs aux aérosols par inhalation, présente des limites, mais aussi des avantages qu'il convient de connaître, en tant qu'utilisateur direct ou indirect. Cet article propose de faire un point sur les performances de prélèvement de la « cassette fermée » et les préconisations de mise en œuvre.

XAVIER
SIMON,
OLIVIER
WITSCHGER
INRS,
département
Métrologie
des polluants

Contexte

En France, le dispositif de prélèvement dit « cassette fermée » est un dispositif de prélèvement largement utilisé pour mesurer l'exposition des travailleurs aux aérosols par inhalation. Plus particulièrement, il est employé pour évaluer la fraction inhalable [1], qui est l'une des trois fractions d'aérosols, à laquelle se rapportent nombre de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) [2]. Par exemple, pour les poussières sans effet spécifique, la VLEP contraignante de 10 mg/m³ correspond à la fraction inhalable.

À l'origine, fin des années 1940, il existait un dispositif de prélèvement d'aérosol de type porte-filtre ouvert, où le filtre n'était pas protégé des dommages éventuellement causés par des manipulations accidentelles ou délibérées (pression d'un doigt, choc d'un crayon, etc.). Pour pallier cette situation, une dizaine d'années plus

tard, une cassette en plastique dite « fermée », possédant un petit orifice circulaire de 4 mm de diamètre pour l'entrée de l'aérosol, permettant d'accueillir des médias filtrants de 37 mm de diamètre, a été conçue pour le contrôle des salles blanches. Connu initialement sous le nom de « *Millipore Monitor* », ce dispositif est devenu populaire dans le domaine de l'hygiène industrielle, en raison de son faible coût, de sa facilité d'emploi et de son caractère jetable. C'est ainsi que la « cassette fermée » fit son apparition dans la première édition du « Manuel des instruments d'échantillonnage d'air » publié par l'ACGIH¹ en 1960. Dès lors, l'utilisation de la « cassette fermée » opérant à un débit de 1 ou 2 L/min s'est diffusée dans divers pays et à ce jour, elle est employée pour mesurer les expositions à des aérosols composés de particules solides ou liquides, organiques ou inorganiques, biologiques, sous forme

ENCADRÉ 1

UN PORTE-FILTRE EMPLOYÉ POUR UN GRAND NOMBRE D'APPLICATIONS

Il existe de nombreux dispositifs de prélèvement qui utilisent tout ou en partie les différents éléments constitutifs d'une « cassette fermée » (pièces de sortie, intermédiaire ou d'entrée). On peut par exemple citer le dispositif à point fixe Cathia (en versions inhalable, thoracique ou alvéolaire) ou des cyclones destinés à mesurer les fractions alvéolaire ou thoracique. Ces utilisations sont distinctes du dispositif de prélèvement de la fraction inhalable « cassette fermée », objet du présent article. En effet, dans ces dispositifs, listés dans la base MétroPol ou dans les bases méthodes du Niosh, de l'IRSST ou du HSL*, les éléments constitutifs sont assemblés pour former des « porte-filtres ». L'emploi du terme « cassette » pour désigner ces derniers n'est pas conforme.

* Niosh : National Institute for Occupational safety and health (États-Unis). IRSST : Institut Robert Sauvé pour la santé au travail (Canada). HSL : Health and safety laboratory (Royaume-Uni).

RÉSUMÉ

En France, le dispositif de prélèvement dit « cassette fermée » est largement utilisé pour mesurer l'exposition des travailleurs aux aérosols par inhalation. Plus particulièrement, il est employé pour évaluer la fraction inhalable, qui est l'une des trois fractions d'aérosols à laquelle se rapportent nombre

de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP). Comme tous les dispositifs de prélèvement, la « cassette fermée » présente des avantages et des limites qu'il convient de connaître en tant qu'utilisateur direct ou indirect. S'appuyant sur une analyse de la littérature et sur des travaux de

laboratoire, cet article présente les performances de prélèvement de la « cassette fermée » et rappelle les bonnes pratiques de mise en œuvre. Par ailleurs, des préconisations sont faites quant à l'utilisation de la cassette par rapport la convention inhalable décrite dans la norme EN 481.

Measurement of inhalable aerosol exposure: advantages and limitations of the "closed cassette"

In France, the "closed cassette" sampling device is widely used to measure workers' exposure to inhalation aerosols. More particularly, it is used to evaluate the inhalable fraction, which is one of the three aerosol fractions to which many occupational exposure limit values (OELs) relate. Like all sampling

devices, the "closed cassette" has advantages and limitations that should be known as a direct or indirect user. Based on an analysis of the literature and on laboratory work, this article presents the sampling performance of the "closed cassette" and recalls the good practices of implementation.

In addition, recommendations are made regarding the use of the cassette in relation to the inhalable convention described in the European EN 481 standard.

de fibres, nanoparticules, etc., dans un grand nombre de secteurs industriels (bois, métallurgie, chimie, traitement des déchets, etc.). D'autres dispositifs ont vu le jour ces trente dernières années qui, pour certains, sont venus supplanter la « cassette fermée » dans plusieurs pays [3]. Néanmoins, en France, la « cassette fermée » opérant à un débit de 2 L/min reste très largement utilisée. Par exemple, la norme NF X43-257 [4] décrit spécifiquement le prélèvement des aérosols à l'aide de la « cassette fermée » à des fins d'évaluation de l'exposition individuelle des travailleurs, et la base de données MétoPol de l'INRS propose de nombreuses méthodes reposant sur l'utilisation de cette « cassette fermée ».

La raison principale de cette mise à l'écart dans certains pays est liée aux performances de prélèvement vis-à-vis de la fraction inhalable, régulièrement critiquées dans la littérature scientifique et technique.

Comme tous les dispositifs de prélèvement, la « cassette fermée » présente des limites, mais aussi des avantages qu'il convient de connaître en tant qu'utilisateur direct (le préleveur, l'analyste) ou indirect (le préventeur, l'utilisateur de base de données d'exposition, l'épidémiologiste, etc.).

Cet article propose une analyse objective des performances de prélèvement de la « cassette fermée » et un rappel des préconisations de mise en œuvre. Il repose sur une analyse de la littérature scientifique et « grise »², ainsi que sur des expériences menées en laboratoire par l'INRS.

L'analyse bibliographique³ repose sur plus de 70 documents, publiés quasi exclusivement au niveau

international durant la période 1985–2019, dont près d'un quart porte sur des travaux menés en laboratoire et le reste concerne des travaux de terrain.

Par « cassette fermée », nous entendons dans cet article le dispositif de prélèvement individuel tel qu'il peut être mis en œuvre pour mesurer la fraction inhalable de l'aérosol d'un travailleur. Il existe par ailleurs de nombreuses utilisations des pièces constitutives d'une cassette en tant que « porte-filtre » (cf. Encadré 1) et dont les performances et préconisations de mise en œuvre ne sont pas traitées ici.

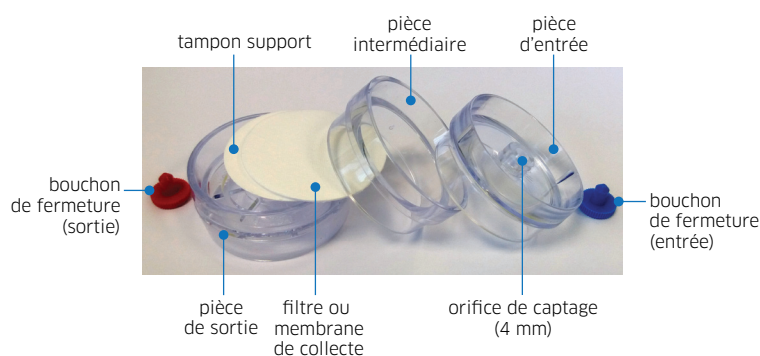
Le dispositif de prélèvement « cassette fermée »

Comme le montre la figure 1, la « cassette fermée » (désignée par la suite « CF ») est composée de différents éléments. Une fois assemblées, les différentes pièces doivent assurer un maintien sans défaut, sans déformation, du média filtrant (et du support si nécessaire), mais également une étanchéité interne parfaite⁴. Les deux bouchons de couleur (entrée et sortie), mis en place lorsque la CF est manipulée ou transportée, sont destinés à limiter la contamination interne.

La CF est disponible en deux tailles pour contenir un média filtrant de diamètre 37 mm (CF37) ou 25 mm (CF25). Chaque configuration peut être assemblée avec deux ou trois pièces. La configuration deux pièces ne dispose donc pas de pièce intermédiaire. Que ce soit pour la CF25 ou la CF37, l'orifice de captage (ou d'aspiration) est identique et mesure 4 mm de diamètre interne.

Lors de son utilisation, la CF est connectée à une pompe individuelle de prélèvement *via* un tuyau flexible, le tout permettant de maintenir le débit de prélèvement à





↑ FIGURE 1 Vue éclatée des éléments qui composent une « cassette fermée » en configuration dite « 3 pièces ». Les bouchons entrée et sortie sont enlevés lors du prélèvement.

CONFIGURATION	NB DE PIÈCES	MATÉRIAUX	DÉBIT (L/min)	VOLUME INTERNE (cm ³)	
				2 PIÈCES	3 PIÈCES
CF25	2 ou 3	Polystyrène (clair, marron)	2	~ 2,5	~ 6
CF37		Polypropylène (opaque blanc, noir)		~ 6,5	~ 15

↑ TABLEAU 1 Caractéristiques des différentes configurations de « cassette fermée » pouvant être mises en œuvre pour la mesure de l'exposition aux aérosols en fraction inhalable.

2 L/min (± 5%) tout au long de la durée de prélèvement (maximum 8 heures). Ce débit est imposé depuis maintenant plus de dix ans, que ce soit dans la norme NF X 43-257 [4] ou dans les documents INRS MétroPol [5,6]. Il permet le prélèvement d'un volume d'air proche de 1 m³ sur une durée d'environ huit heures et la collecte d'une quantité de matière particulaire généralement suffisante pour mesurer des concentrations de l'ordre du dixième de la VLEP du polluant ciblé.

Pour le débit imposé pour la CF, la vitesse de l'air au sein de l'orifice de captage (ou d'aspiration) est de 2,6 m/s, ce qui correspond à un nombre de Reynolds d'environ 700, soit un écoulement laminaire. Néanmoins, à l'intérieur de la cassette se forme un jet dont la portée (en configuration jet libre) est théoriquement de 20 mm, soit supérieure à la distance orifice – média filtrant. Cela signifie que lors d'un prélèvement, ce jet s'écrase sur le média filtrant et qu'il y a formation, au sein de la cassette, de zones de recirculation pouvant piéger en leur sein des particules.

Comme pour tous les dispositifs de prélèvement individuel, l'orifice de captage de la CF doit être localisé dans la zone respiratoire de l'opérateur⁵ et dirigé vers l'avant. De plus, la CF doit être solidaire de l'opérateur avec le plan du filtre parallèle au plan du thorax. Ce positionnement précis tout au long du prélèvement est une exigence en France depuis plus de trente ans : il est par exemple clairement décrit dans la norme

NF X 43-257 depuis 1988. Tout autre positionnement est donc à écarter formellement en France, dès lors que la CF est destinée à mesurer la fraction inhalable. Le maintien correct de la CF impose l'utilisation systématique d'un élément de fixation ou de maintien sur un boudrier, ou bien l'utilisation d'un dispositif spécifique porte-cassette. Certains de ces éléments sont disponibles dans le commerce depuis de nombreuses années.

Comme l'indique le *tableau 1*, les matériaux constitutifs des éléments d'une CF sont multiples. Le choix du matériau va dépendre de la nature du polluant particulaire ou de la méthode d'analyse envisagée pour l'échantillon. Dans la plupart des situations, le matériau utilisé est en polystyrène clair. Les matériaux opaques permettent de protéger l'échantillon prélevé des effets de la lumière. Le matériau noir est de plus conducteur, ce qui limite théoriquement les effets liés aux charges électrostatiques portées par les particules (*voir ci-dessous*). Ainsi, les médias filtrants qui peuvent être utilisés dans la CF sont de différentes natures et vont dépendre du type d'analyse : membranes en PVC, PTFE, polycarbonate, ester de cellulose, fibres de verre ou de quartz. D'une manière générale, tous les médias filtrants montrent une perméance⁶ très faible [7,8]. Des expériences menées à l'INRS montrent que les filtres typiquement utilisés pour la mesure des expositions professionnelles présentent des valeurs de perméance comprises entre 10⁻³ et 10⁻⁵, en fonction de la méthode de mesure⁴. Ainsi, dans la mesure où l'étanchéité interne est parfaite, la question de la perte de particules *via* un transfert interne au travers de la CF ne se pose pas, y compris pour les particules les plus petites, pouvant être de taille nanométrique.

Il existe dans le commerce des cassettes préassemblées, équipées de différents médias filtrants prépesés, directement prêtes pour le prélèvement. Le *tableau 2* indique également les volumes internes pour les différentes configurations. Ceux-ci sont compris entre ~2,5 et ~15 cm³. Pour certaines analyses, comme décrit plus loin, il est indispensable d'extraire l'ensemble des particules captées par la CF. Certaines des méthodes d'analyse reposent sur une extraction (ou élution) directement dans la CF, à l'aide d'un mélange de liquides réactifs⁷, qui peut être introduit directement à l'intérieur de la CF *via* l'orifice de 4 mm de diamètre.

Dépôt des particules captées

Une fraction des particules de l'aérosol présentes dans la zone respiratoire, passant à proximité de l'orifice de captage de la CF, est aspirée sous l'effet de l'écoulement d'air imposé par la pompe individuelle. Une fois « captées » par l'orifice, ces particules sont transférées *via* le conduit d'entrée (de longueur ~6 mm) au sein du volume de la CF, où elles se déposent sur le média filtrant (qui représente ~1/3 de la surface interne),

mais aussi à différents endroits sur les parois internes, comme l'illustre la *figure 2*. On désigne ainsi différentes fractions caractéristiques en lien avec la CF :

- la fraction « captée » est la fraction de l'aérosol présent dans la zone respiratoire qui a été captée par l'orifice d'entrée;
- la fraction « collectée » est la fraction de l'aérosol présent dans la zone respiratoire qui est effectivement collectée par le média filtrant;
- la fraction « déposée » est la fraction de l'aérosol « capté » qui s'est déposée sur l'ensemble des parois internes, excepté le média filtrant.

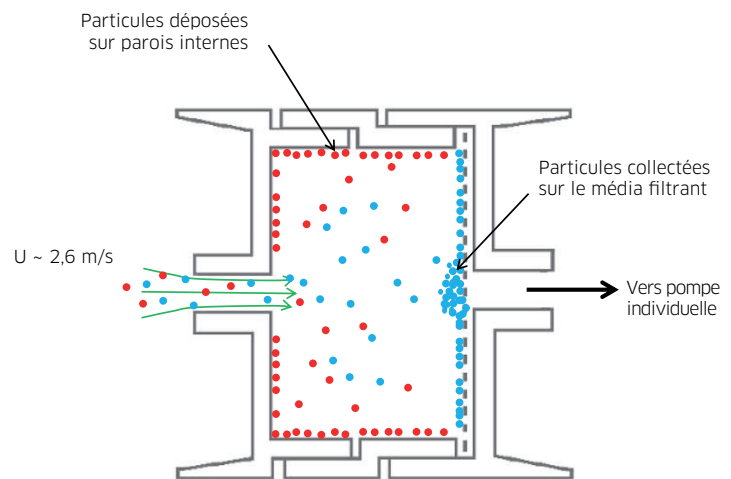
La configuration interne de la CF, ainsi que l'écoulement d'air qui en résulte (décrit précédemment) sont à l'origine d'une part, d'un dépôt non homogène sur le média filtrant (avec bien souvent une zone d'impaction visible en son centre) et d'autre part, du dépôt des particules sur toutes les autres surfaces internes.

Plusieurs mécanismes peuvent expliquer ce dépôt des particules sur les parois internes plutôt que sur le média filtrant : diffusion brownienne, diffusion turbulente, sédimentation, attraction électrostatique, rebond sur le média filtrant, etc. Il existe plusieurs études dans la littérature qui indiquent que la fraction déposée est très variable, de quelques pourcents à plus de 90%. La quantité de particules sur le média filtrant peut donc être parfois bien inférieure à celle sur les parois. Par ailleurs, cette fraction déposée est aléatoire, elle n'est donc pas prévisible. Ce constat est fait de longue date pour différents types de particules, et est largement documenté. Pour autant, les déterminants qui gouvernent ce dépôt ne sont pas clairement identifiés. Comme indiqué dans le *tableau 1*, il existe des CF en matériau conducteur pouvant a priori réduire les dépôts par effet électrostatique. Néanmoins, l'impact réel de l'utilisation de ce type de cassette demande à être démontré.

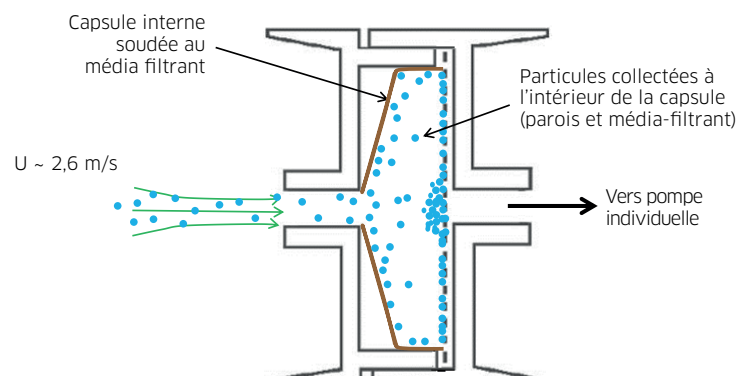
À l'issue du prélèvement, lorsque la CF est manipulée ou transportée, il y a également une probabilité non négligeable que les particules déposées sur les parois internes ou le média filtrant se détachent et se transfèrent à un autre endroit.

Tous ces éléments conduisent à définir, pour la CF, l'échantillon à analyser comme étant constitué des particules collectées sur le média filtrant, ainsi que de celles déposées sur les parois internes [9]. Pour cette raison, en France, la mesure de l'exposition aux aérosols en fraction inhalable repose sur la base de la fraction captée, et non la fraction collectée [4]. La seule exception concerne les poussières de bois, pour lesquelles la VLEP fixée dans l'arrêté du 20 décembre 2004⁸ repose sur l'analyse gravimétrique de la fraction collectée sur le filtre dans la CF. Pour les poussières de bois, ce n'est donc pas la fraction inhalable des poussières en suspension dans l'air qui est mesurée.

Il existe plusieurs méthodes pour prendre en compte l'ensemble des particules captées lors de l'analyse



↑ FIGURE 2 Illustration lors d'un prélèvement des particules dites « déposées » et des particules dites « collectées » dans une « cassette fermée » (trois pièces) en position horizontale opérant au débit de 2 L/min.



↑ FIGURE 3 Illustration d'un prélèvement de particules à l'aide d'une cassette fermée (deux pièces) intégrant une capsule interne en position horizontale opérant à 2 L/min.

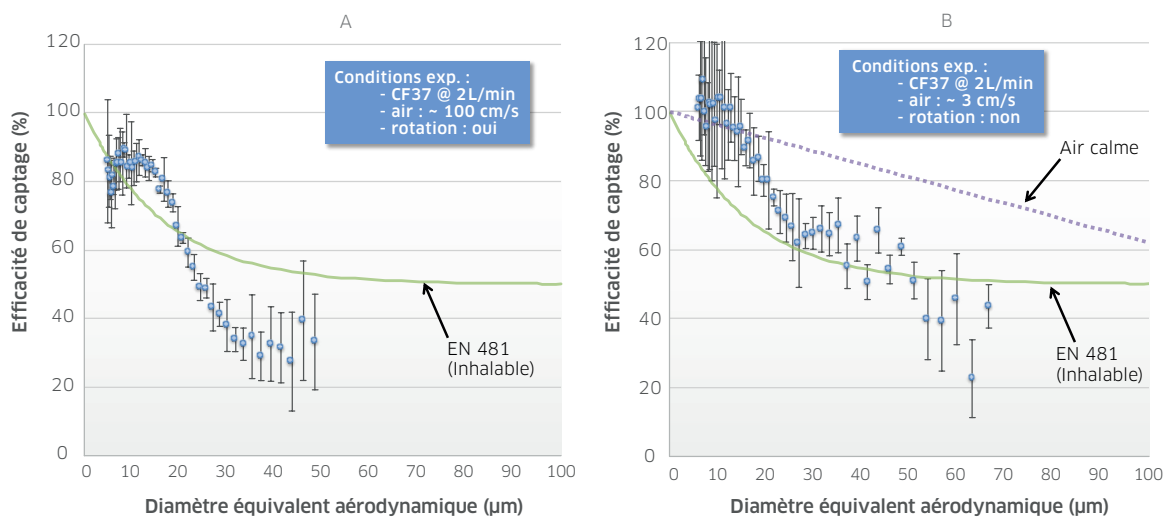
post-prélèvement [10], et certaines d'entre elles sont décrites dans la base MétroPol (INRS)⁶. Lorsque cela est possible, une mise en solution ou une extraction peut être directement faite dans la CF. Ces méthodes doivent avoir été préalablement validées et notamment présenter un taux de récupération des particules satisfaisant, lorsque celles-ci sont déposées sur l'ensemble des parois.

Concernant l'analyse gravimétrique, une méthode différente est proposée. Elle repose sur l'utilisation d'un élément spécifique, qui est une capsule intégrant un média filtrant, l'ensemble étant pesé avant et après le prélèvement (comme avec n'importe quel média filtrant). Comme illustré sur la *figure 3*, cette capsule qui épouse bien la géométrie interne de la cassette fait que toutes les particules entrant dans la capsule font partie de l'échantillon qui sera analysé.

Il existe différentes capsules dans le commerce; certaines sont adaptées à l'analyse gravimétrique (média filtrant de type PVC) et d'autres à certaines analyses chimiques (média filtrant de type ester de cellulose).



FIGURE 4 → Efficacité de captage de la CF37 (polystyrène clair) opérant à 2 L/min en mouvement (A) et d'air calme (B). Valeurs moyennes sur trois essais et IC (95%).



La géométrie de ces capsules impose d'utiliser des CF en configuration deux pièces. La présence d'une capsule interne soudée au filtre présente par contre un désavantage lors d'une analyse gravimétrique : la pesée d'un objet plus volumineux, de masse initiale plus grande et qui est en partie constitué de plastique, occasionne en effet une limite de quantification plus élevée en comparaison d'un filtre de même nature, pesé seul sans capsule [4].

Performance de prélèvement relative à la fraction inhalable

D'une manière générale, les performances de prélèvement d'un dispositif dépendent de différents paramètres liés à la géométrie interne et externe du dispositif, aux écoulements d'air externes et internes qui transportent les particules de l'aérosol, bien souvent polydispersées en taille, à l'orientation du dispositif par rapport à la gravité, etc. La connaissance des performances de prélèvement d'un dispositif est donc fondamentale pour l'évaluation des expositions. Ces performances s'obtiennent au travers de travaux de laboratoire, mais aussi de terrain, dont les exigences en Europe sont décrites dans la série de normes EN 13205 [11].

L'analyse de la littérature scientifique concernant la CF suggère qu'il existe deux déterminants qui limitent considérablement les performances de prélèvement:

- **l'orientation de la CF.** Lorsque celle-ci est inclinée vers le bas (ce qui se produit lorsqu'elle n'est pas correctement fixée sur l'opérateur), son efficacité diminue fortement par rapport à une orientation horizontale, typiquement d'un facteur 1,5 (et 2,8) pour un diamètre aérodynamique de particule de 15 µm (et 25 µm, respectivement);
- **la vitesse externe de l'air incident.** Plus la vitesse d'air externe augmente, plus l'efficacité de la CF a tendance à diminuer. Peu visible ou inexistant pour les particules de diamètre inférieur à 15 µm, ce phénomène a tendance à s'accroître pour les particules de diamètre plus élevé.

Ces deux déterminants ne sont pas propres à la CF, ils concernent également les autres dispositifs de prélèvement visant la fraction inhalable, tels que le CIP 10-I, le GSP, l'IOM et dans une moindre mesure, le *Button Sampler* [14].

L'analyse de la littérature révèle aussi qu'il existe finalement très peu de travaux de recherche menés dans les conditions d'utilisation de la CF exigées en France. Concernant les études menées sur le terrain, seules deux peuvent être incluses : elles concernent les poussières de bois [12] et des aérosols inorganiques issus de procédés métallurgiques [13]. Les résultats indiquent que, globalement, les rapports des performances relatives « *autre dispositif de prélèvement de la fraction inhalable / CF37* » sont compris dans l'intervalle d'environ 0,85 à 1,20. Compte tenu du fait que ce sont des résultats obtenus sur le terrain, ces données permettent de conclure à une relative bonne concordance des performances de la CF par rapport aux autres dispositifs mis en œuvre (CIP10-I, IOM et *Button Sampler*). Néanmoins, il est clair que le nombre de données de terrain fait défaut.

Concernant les performances de prélèvement de la CF obtenues en laboratoire, les seuls travaux présentant des données expérimentales d'efficacité de captage ont été réalisés à l'INRS. Les résultats obtenus pour un air en mouvement (vitesse d'air incidente de 1 m/s) ont été publiés en 2010 (cf. la figure 13 de l'article cité [14]) et intégrés dans *MétoPol*. Des travaux complémentaires ont été menés pour la CF à 2 L/min dans un tunnel aérodynamique vertical, pour un air calme (faible vitesse d'air : ~3 cm/s). Pour les deux conditions, la méthodologie expérimentale est la même [14].

La figure 4 présente les résultats d'efficacité de captage pour les deux conditions: air en mouvement (graphe A) et air calme (graphe B). Rappelons que pour les expériences menées en air en mouvement, le dispositif est en rotation continue à 2 tours/min et qu'il s'agit donc ici d'une moyenne omnidirectionnelle. Sur les graphes, les points expérimentaux sont présentés aux côtés de

la courbe cible décrivant la « convention inhalable » (cf. norme EN 481 [1]), mais également pour les données obtenues en air calme au côté de la courbe dite « air calme », celle-ci devant prochainement être intégrée dans la révision de la norme EN 481 (cf. Encadré 2). Pour les études en laboratoire, le domaine de taille des particules d'essais doit théoriquement couvrir l'intervalle de 0 à 100 µm (en diamètre équivalent aérodynamique). Cependant, les contraintes expérimentales, partagées par toutes les équipes de recherche œuvrant dans ce domaine, ne permettent pas de produire des résultats validés sur toute la gamme.

Ces résultats suggèrent qu'en conditions d'air en mouvement, la CF 37 opérant à 2 L/min tend à sous-estimer la fraction inhalable, dès lors que des particules de diamètre supérieur à 20 µm sont présentes dans la zone respiratoire. Des résultats similaires avaient été observés pour les dispositifs IOM et *Button Sampler*, avec néanmoins une décroissance moins prononcée [14].

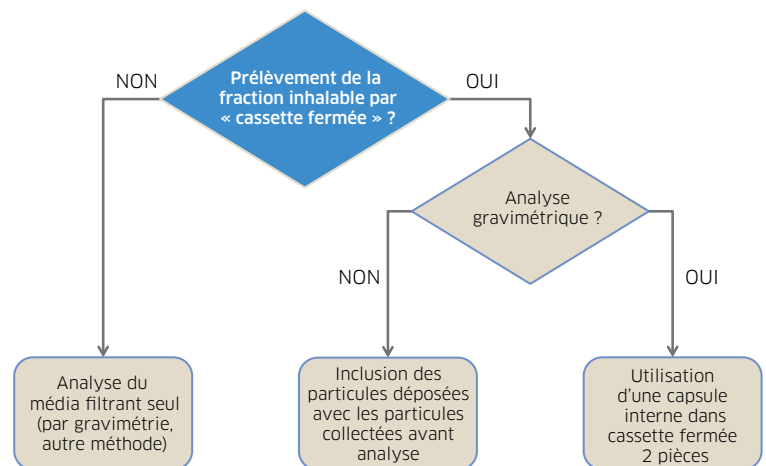
Concernant la configuration dite « air calme », les résultats de la figure 4B sont inédits. On constate une augmentation de l'efficacité de captage par rapport aux points expérimentaux mesurés pour l'air en mouvement. En comparaison avec les performances des dispositifs IOM et *Button Sampler* [14], la CF 37 montre une efficacité de captage plus faible, qui sous-estime la courbe proposée dite « air calme » pour les particules de diamètre supérieur à 20 µm. L'efficacité de la CF 37 présente, par contre, une relativement bonne adéquation avec l'actuelle « convention inhalable ».

Préconisations pour la prise en compte des dépôts

Au-delà des préconisations de mise en œuvre existantes depuis plusieurs années et rappelées dans cet article concernant le débit de prélèvement, l'orientation de la CF, l'étanchéité interne, etc., il semble important de proposer aussi des préconisations pour la prise en compte des dépôts dans l'échantillon.

Les préconisations régissant la prise en compte des dépôts de particules dans la CF sont définies par le logigramme de la figure 5. Ainsi, dans la mesure où le prélèvement vise la fraction inhalable et quand l'analyse gravimétrique est retenue, c'est une CF deux pièces intégrant une capsule interne qui doit être mise en œuvre. Si une autre analyse physico-chimique ou biologique est envisagée, l'inclusion des particules déposées dans l'échantillon global est indispensable. Dès lors que l'analyse réalisée ne concerne que le média filtrant (c'est-à-dire que les particules déposées ne sont pas intégrées dans l'échantillon), le prélèvement à l'aide de la CF ne peut être revendiqué comme un prélèvement de la fraction inhalable.

Ces règles de prise en compte des dépôts sont par ailleurs préconisées par le Niosh depuis plusieurs années [10].



↑ FIGURE 5 Préconisations relatives au prélèvement à l'aide de la « cassette fermée ».

CASSETTE FERMÉE @ 2 L/min	
AVANTAGES	LIMITES
Orifice d'entrée limitant les projections	Assemblage (problème lié à l'étanchéité interne)
Dispositif de faible dimension (hors pompe individuelle)	Désassemblage non pratique
Compatibilité avec de nombreux médias filtrants	Débit faible (2 L/min)
Faible coût des pièces constitutives	Dépôts aléatoires sur les parois internes
Pas de maintenance (usage unique)	Dépôt non uniforme sur le média filtrant
Choix possible entre différents matériaux constitutifs	Effets électrostatiques pour certains matériaux
Mise en solution directement dans la cassette	Efficacité de captage limitée en air en mouvement et en air calme au-dessus de 20 µm, en comparaison à l'actuelle convention inhalable et à la courbe « air calme », respectivement
CF pré-montées et pré-pesées disponibles	Nécessite une pièce d'adaptation pour maintien de l'orientation horizontale

↑ TABLEAU 2 Avantages et limites de la cassette fermée opérant à 2 L/min pour la mesure de l'exposition aux aérosols en fraction inhalable.

Conclusion et perspectives

Le bilan des performances réalisé et les nouvelles données sur les performances établies en laboratoire permettent de rappeler les bonnes pratiques et de faire de nouvelles préconisations quant à l'utilisation de la CF pour la mesure de l'exposition aux aérosols en fraction inhalable. Les bonnes pratiques de mise en œuvre sont les suivantes: débit de prélèvement à 2 L/min, CF solidarisée à l'opérateur, positionnée dans sa zone respiratoire, plan du filtre toujours maintenu parallèle au plan du thorax et orifice de 4 mm de diamètre toujours dirigé vers l'avant.

Concernant les nouvelles préconisations: si la fraction visée est la fraction inhalable, il est indispensable de considérer l'échantillon à analyser (par gravimétrie ou autre) comme étant l'échantillon composé des



ENCADRÉ 2

UNE ÉVOLUTION ATTENDUE DE LA CONVENTION INHALABLE INTÉGRANT LA NOTION D'AIR CALME

La « convention inhalable », telle qu'elle est décrite dans la norme EN 481, a été établie sur la base d'expérimentations menées avec des mannequins de laboratoire dans des veines d'essais pour des vitesses d'air U_a comprises entre ~0,5 et 4 m/s. Toutefois, cela ne correspond plus aux situations les plus courantes dans les pays industrialisés. En effet, bien qu'il existe peu d'études sur le sujet, il est désormais admis que dans la plupart des environnements intérieurs, les vitesses d'air sont généralement $\leq 0,2$ m/s. Par ailleurs, des travaux expérimentaux réalisés cette fois dans des chambres d'air calme ont montré que l'efficacité d'inhalation de mannequins de laboratoire ne correspondait pas à la convention inhalable actuelle, remettant en cause le caractère universel de celle-ci. Dans ce contexte, une évolution de la norme EN 481 va être proposée prochainement, dans laquelle la courbe actuelle ne s'appliquera que lorsque U_a sera comprise entre 0,2 et 4 m/s, et où sera intégrée une nouvelle convention dite « air calme » pour $U_a < 0,2$ m/s.

particules collectées sur le média filtrant et des particules déposées sur les parois internes. Des règles de prise en compte des particules déposées en fonction du type d'analyse ont été définies. Par ailleurs, le *tableau 2* dresse une liste des avantages et limites de l'usage de la CF.

Comme déjà évoqué, les données correspondant à la configuration exigée pour le prélèvement de la fraction inhalable sont peu nombreuses: deux études de terrain et une étude en laboratoire, toutes réalisées par l'INRS. Il semble donc nécessaire que ces données puissent être complétées par d'autres, afin d'asseoir les résultats et les préconisations faites. Au-delà, dans un contexte de diminution des niveaux de concentrations dans les

atmosphères professionnelles et d'abaissement des VLEP, il apparaît utile de concevoir un nouveau dispositif de prélèvement pour la fraction inhalable intégrant des éléments qui sont actuellement limitants avec la CF, mais aussi avec les autres dispositifs de prélèvement disponibles dans le commerce, à savoir par exemple: un débit de prélèvement plus élevé (~10 L/min), une géométrie interne limitant le dépôt des particules, une collecte multi-supports permettant d'accéder à différentes analyses à l'issue d'un même prélèvement, des performances de prélèvement plus en accord avec la « convention inhalable » (cf. *Encadré 2*), un couplage avec un signal en temps réel représentatif de la concentration et/ou de la taille des particules. ●

1. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Cincinnati, Ohio).
2. Publications non nécessairement validées ou éditées, échangées en général dans le cadre de réseaux (professionnels, de recherche, etc.) ou diffusées librement sur les sites d'universités, d'instituts, etc.
3. La liste complète des références bibliographiques est disponible sur www.inrs.fr, dans les pages de la revue (www.inrs.fr/hst), jointe au document de l'article (NT 78, au format .pdf).
4. Pour plus détails, voir les fiches MétroPol: « Prélèvement des aérosols par cassette fermée » ; « Préparation des dispositifs de prélèvement en vue d'une intervention en entreprise ». Accessibles sur: www.inrs.fr
5. Définie comme étant la demi-sphère de 30 cm de rayon située devant le visage du sujet et centrée sur sa bouche.
6. Rapport de la concentration en particules en sortie du filtre par rapport à celle en entrée.
7. Voir par exemple les méthodes MétroPol relative aux métaux et métalloïdes M-124 ou aux micro-organismes cultivables M-147 (INRS). Accessibles sur: www.inrs.fr
8. Arrêté du 20 décembre 2004, relatif à la méthode de mesure pour le respect des concentrations en poussières de bois dans l'atmosphère des lieux de travail. Accessible sur: www.legifrance.gouv.fr

BIBLIOGRAPHIE

[1] NF EN 481 – Atmosphères des lieux de travail - Définitions des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air. Afnor, novembre 1993, 11 p.

[2] ED 984 – Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France, 4^e édition. INRS, octobre 2016, 32 p. (www.inrs.fr)

[3] FD CEN/TR 15230 – Atmosphères de lieux de travail - Guide pour l'échantillonnage des fractions d'aérosols inhalables, thoraciques et alvéolaires. Afnor, novembre 2005, 28 p.

[4] NF X 43-257 – Qualité de l'air – Air des lieux de travail – Prélèvement d'aérosol à l'aide d'une cassette (orifice 4 mm). Afnor, août 2016, 25 p.

[5] INRS – Prélèvement des aérosols par cassette fermée. Guide Méthodologique MétroPol, octobre 2015, 15 p. (www.inrs.fr)

[6] M-274 – Aérosols en fraction inhalable. Fiche Metropol. INRS, septembre 2016, 7 p. (www.inrs.fr/publications/bdd/metropol)

[7] Soo J.C., MONAGHAN K., LEE T. ET AL. – Air sampling filtration media: Collection efficiency for respirable size-selective sampling. *Aerosol Science and Technology*, 2016, 50 (1), pp. 76-87.

[8] BURTON N.C., GRINSHUPUN S.A., REPONEN T. – Physical collection efficiency of filter materials for bacteria and viruses. *Annals of Occupational Hygiene*, 2007, 51 (2), pp. 143-151.

[9] BRISSON M.J., ARCHULETA M.M. – The real issue with wall deposits in closed filter cassettes – What's the sample? *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2009, 6 (12), pp. 783-788.

[10] ASHLEY K., HARPER M. – Closed-face filter cassette (CFC) sampling – Guidance on procedures for inclusion of material adhering to internal sampler surfaces. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2013, 10 (3), D29-D33.

[11] NF EN 13205 – 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 - Parties 1 à 6. Afnor, août 2014, 25 p.

[12] KAUFFER E., WROBEL R., SIMON X. ET AL. – Comparaison sur site dans l'industrie du bois de quelques échantillonneurs d'aérosol. *Hygiène et sécurité du travail*, 2010, 219, ND 2326, pp. 3-17. (www.inrs.fr/hst)

[13] DEMANGE M., GÖRNER P., ELCABACHE J.M., WROBEL R. – Field comparison of 37-mm closed-face cassettes and IOM samplers. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 2002, 17 (3), pp. 200-208.

[14] GÖRNER P., SIMON X., WROBEL R., KAUFFER E., WITSCHGER O. – Étude au laboratoire de quelques échantillonneurs individuels de la fraction inhalable. *Hygiène et sécurité du travail*, 2010, 219, ND 2327, pp. 19-39.