

ÉTUDE AU LABORATOIRE DE QUELQUES ÉCHANTILLONNEURS INDIVIDUELS DE LA FRACTION INHALABLE

L'évaluation de l'exposition à des poussières inhalables nécessite des méthodes d'échantillonnage fiables pour mesurer les concentrations de particules inhalables présentes dans l'air. De nombreux échantillonneurs d'aérosols inhalables sont disponibles, mais leurs performances varient largement et restent inconnues dans certains cas. Les performances d'échantillonnage de ces échantillonneurs dépendent fortement de la taille des particules et de la vitesse de l'air ambiant. Cinq échantillonneurs de fraction inhalable ont été étudiés dans deux tunnels aérauliques de laboratoire, à l'aide d'aérosols tests constitués de billes de verre polydispersées. Les échantillonneurs testés étaient l'échantillonneur IOM (GB), deux versions de l'échantillonneur CIP 10-I, v1 et v2 (F), une cassette fermée de 37 mm (USA), une cassette de 37 mm équipée d'une capsule ACCU-CAP™ (USA) et un échantillonneur Bouton (USA). Les efficacités d'échantillonnage en fonction de la taille des particules ont été mesurées dans un tunnel aéraulique horizontal présentant une vitesse d'air de 1 m.s⁻¹, ainsi que dans un tunnel vertical à air calme, par une méthode spécifique faisant appel à des déterminations de la distribution en nombre des tailles de particule par un compteur Coulter®. Par rapport aux critères d'échantillonnage CEN-ISO-ACGIH pour les poussières inhalables, les résultats expérimentaux révèlent une efficacité d'échantillonnage suffisamment élevée pour les échantillonneurs IOM et CIP 10-I v2 et des efficacités légèrement plus faibles pour les échantillonneurs Bouton et CIP 10-I v1. La cassette fermée (orifice de 4 mm) produisait les moins bonnes performances de tous les échantillonneurs testés. On peut cependant les améliorer à l'aide de la capsule interne ACCU-CAP™, qui empêche les pertes de particules sur les parois intérieures de la cassette. Des différences importantes entre les efficacités d'échantillonnage dans un air en mouvement et dans un air calme ont été observées pour tous les échantillonneurs étudiés.

Cette étude de l'INRS a été initialement publiée dans *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 54, n°2, pp. 165-187, 2010. La version française est produite avec l'aimable autorisation d'Oxford University Press© 2010 British Occupational Hygiene Society Published by Oxford University Press.

- ACCU- CAP™
- Efficacité d'échantillonnage d'aérosol
- Échantillonneur Bouton
- CIP 10-I
- Courbe conventionnelle de la fraction inhalable
- Cassette fermée
- Échantillonneur IOM

► *Peter GORNER, Xavier SIMON, Richard WROBEL, Edmond KAUFFER, Olivier WITSCHGER, INRS, département Métrologie des polluants*

LABORATORY STUDY OF SELECTED PERSONAL INHALABLE AEROSOL SAMPLERS

Assessment of inhalable dust exposure requires reliable sampling methods in order to measure airborne inhalable particles' concentrations. Many inhalable aerosol samplers can be used but their performances widely vary and remain unknown in some cases. The sampling performance of inhalable samplers is strongly dependent on particle size and ambient air velocity.

Five inhalable aerosol samplers have been studied in two laboratory wind tunnels using polydisperse glass-beads' test aerosol. Samplers tested were IOM sampler (UK), two versions of CIP 10-I sampler, v1 and v2 (F), 37-mm closed face cassette sampler (USA), 37-mm cassette fitted up with an ACCU-CAP™ insert (USA), and Button sampler (USA). Particle size-dependent sampling efficiencies were measured in a horizontal wind tunnel under a 1 m s⁻¹ wind velocity and in a vertical tunnel under calm air, using a specific method with Coulter® counter particle size number distribution determinations. Compared with CEN-ISO-ACGIH sampling criteria for inhalable dust, the experimental results show fairly high sampling efficiency for the IOM and CIP 10-I v2 samplers and slightly lower efficiencies for the Button and CIP 10-I v1 samplers. The closed face cassette (4-mm orifice) produced the poorest performances of all the tested samplers. This can be improved by using the ACCU-CAP™ internal capsule, which prevents inner wall losses inside the cassette. Significant differences between moving air and calm air sampling efficiency were observed for all the studied samplers.

- ACCU-CAP™
- Aerosol sampling efficiency
- Button sampler
- CIP 10-I
- Inhalable convention
- Closed face cassette
- IOM sampler

INTRODUCTION

La pollution par les poussières industrielles, tant sur le lieu de travail que dans l'environnement, demeure un problème d'actualité dans les pays développés comme dans ceux en cours de développement (OMS, 1999). L'exposition des ouvriers aux poussières nocives est couramment mesurée dans le cadre des contrôles d'hygiène du travail. Les fractions conventionnelles d'aérosol liées à la santé constituent des spécifications à respecter lors de l'échantillonnage de particules en fonction de leur taille. La fraction d'aérosol inhalable est échantillonnée pour la plupart des polluants de l'air présents sous forme de particules, par exemple les poussières de bois. Cette fraction, définie par des conventions CEN (1993), ISO (1995) et ACGIH (1994-1995), décrit l'efficacité avec laquelle des particules sont aspirées dans le nez et la bouche en fonction de leur diamètre aérodynamique, sur un intervalle allant de 0 à 100 μm et une plage de vitesses d'air comprise entre 0 et 4 m.s^{-1} . La nécessité d'une courbe conventionnelle de la fraction inhalable « en air calme » a récemment été exprimée par Lidén et Harper (2006) sur la base d'avancées scientifiques en matière de mesure de l'inhalabilité des particules (Aitken *et al.*, 1999 ; Brown, 2005). Des mesures de la vitesse de l'air sur un lieu de travail en intérieur, conduites par Baldwin et Maynard (1998), ont montré qu'une courbe conventionnelle de la fraction inhalable en air calme conviendrait à de nombreuses situations professionnelles rencontrées aujourd'hui (vitesses d'air généralement inférieures à 0,3 m.s^{-1}).

Près de 3,5 millions de personnes (2 % de tous les employés dans 25 pays de l'Union européenne) sont actuellement exposés professionnellement à des poussières de bois (Kauppinen *et al.*, 2006). Le cancer du nez des ouvriers du bois représente la deuxième cause de cancer d'origine professionnelle en France (INRS, 2006). Au niveau européen, la valeur limite d'exposition professionnelle pour les poussières de bois sur le lieu de travail varie entre 1 et 5 mg.m^{-3} . Ces seuils doivent généralement être appliqués à la fraction d'aérosol inhalable. En France, l'ancien seuil de 5 mg.m^{-3} a été abaissé à 1 mg.m^{-3} en 2003, cette dernière valeur étant applicable depuis 2005 (Décret législatif, 2003).

L'évaluation précise des expositions à des poussières inhalables nécessite des procédés d'échantillonnage fiables pour mesurer la concentration inhalable des particules en suspension dans l'air. De nombreuses techniques d'échantillonnage sont disponibles dans le monde, mais leur efficacité varie et est même inconnue dans certains cas. Une sélection d'échantillonneurs adaptés est donnée dans le « guide d'échantillonnage » du CEN (2005), avec leurs caractéristiques de performances telles qu'elles sont publiées dans la littérature scientifique.

L'efficacité des échantillonneurs d'aérosols se mesure généralement dans un tunnel aéraulique, en utilisant des aérosols monodispersés ou polydispersés. L'efficacité d'un échantillonneur est déterminée par le rapport entre la concentration d'aérosol échantillonnée et une concentration de référence, en fonction du diamètre aérodynamique des particules. Des évaluations théoriques et expérimentales des performances d'un échantillonneur montrent que l'efficacité d'échantillonnage dépend fortement de la taille des particules et de la vitesse de l'air ambiant. L'efficacité d'échantillonnage peut être évaluée en laboratoire dans des conditions de vitesse d'air élevée (Buchan *et al.*, 1986 ; Chung *et al.*, 1987 ; Vincent et Mark, 1990 ; Vincent *et al.*, 1990 ; Kenny *et al.*, 1997 ; Witschger *et al.*, 1997 ; Bartley, 1998 ; Aizenberg *et al.*, 2000a,b, 2001 ; Li *et al.*, 2000 ; Kennedy *et al.*, 2001 ; Paik et Vincent, 2004, par exemple) ou dans des conditions d'air très peu mobiles (Kenny *et al.*, 1999 ; Roger, 2000 ; Witschger *et al.*, 2004 ; Schmees *et al.*, 2008). Les performances des échantillonneurs individuels de la fraction inhalable ont le plus souvent été évaluées dans l'air en mouvement et seulement quelques études se sont intéressées à un air réellement calme (Kenny *et al.*, 1999 ; Görner *et al.*, 2008).

Nous avons choisi cinq échantillonneurs en vue d'essais approfondis au laboratoire et sur le lieu de travail. Cet article présente et analyse les résultats de mesures de l'efficacité d'échantillonnage conduites dans un tunnel aéraulique, à la vitesse de 1 m.s^{-1} et dans des conditions d'air calme. Des essais comparatifs sur le terrain, avec prélèvement de poussières de bois par les mêmes échantillonneurs dans divers environnements industriels sont présentés par Kauffer *et al.* (2010).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

TECHNIQUES D'ÉCHANTILLONNAGE D'AÉROSOLS INHALABLES

Les échantillonneurs d'aérosols inhalables utilisés dans cette étude sont listés et représentés dans le *Tableau 1*, avec leurs débits nominaux. Ils ont notamment été choisis au regard de leur disponibilité sur le marché, de leur efficacité supposée et de leur facilité de mise en œuvre et d'utilisation.

L'échantillonneur IOM (Mark et Vincent, 1986) a été choisi car il est utilisé dans le monde entier pour échantillonner des aérosols en fraction inhalable par prélèvement individuel. Les particules sont aspirées dans le dispositif à travers un orifice d'entrée circulaire de 15 mm, sous un débit d'aspiration de 2 l.min^{-1} . Le capteur comprend une cassette interne en plastique que l'on pèse avec le filtre de 25 mm qu'elle contient. La plupart des particules passant par l'orifice d'entrée sont captées par le filtre, le reste se déposant sur les parois intérieures de la cassette. On sait que ce capteur remplit les critères d'échantillonnage de la fraction inhalable dans l'air en mouvement (Kenny *et al.*, 1997 ; Kennedy *et al.*, 2001) pour des diamètres aérodynamiques de particule inférieurs à 100 μm et quand le capteur n'est pas dirigé directement face au vent (Li *et al.*, 2000) ou en présence de grosses particules projetées, éventuellement présentes dans l'atmosphère de travail. La connaissance de ses performances dans un environnement proche de l'air calme est limitée à quelques études, notamment celles de Roger *et al.* (1998) et Kenny *et al.* (1999).

L'échantillonneur de la fraction inhalable CIP 10-I a été développé à partir de ses précédentes versions respirable et thoracique (Courbon *et al.*, 1988 ; Fabries *et al.*, 1998). Le principe de l'échantillonneur CIP 10 est basé sur l'aspiration d'un aérosol à travers une fente annulaire, avec un débit d'aspiration de 10 l.min^{-1} et filtration de l'air par un filtre rotatif en mousse poreuse (Görner *et al.*, 1990). Ce capteur est couramment utilisé dans l'industrie française du bois en raison de son débit élevé et de sa tête de prélèvement multidirectionnelle protégée de manière à limiter le prélèvement éventuel de grosses particules projetées.

TABLEAU I

Échantillonneurs de la fraction inhalable étudiés

Échantillonneur	IOM	CIP 10-1 v1 et v2	Cassette fermée 37 mm	ACCU-CAP™	Bouton
distributeur	SKC	ARELCO	MILLIPORE	OMEGA	SKC
débit (L.min ⁻¹)	2	10	1 ; 2	1 ; 2	4
photos					

Historiquement, on connaît deux versions de l'échantillonneur de fractions inhalables CIP 10-1. La première version (v1), qui peut donner lieu à certaines pertes de particules par dépôt au niveau des parois intérieures (Kenny *et al.*, 1997), a été récemment améliorée par l'ajout d'une fente d'aspiration annulaire horizontale (Görner *et al.*, 2008) pour donner la version finale (v2) brevetée (Görner *et al.*, 2003), décrite en détail par Görner *et al.* (2009). Les deux versions ont été testées en laboratoire dans cette étude. Cependant, la version v2 n'était pas disponible en nombre suffisant pour être largement utilisée lors des essais sur le terrain durant l'étude associée de Kauffer *et al.* (2010).

La cassette fermée de diamètre 37 mm est le capteur le plus couramment utilisé pour échantillonner la fraction inhalable d'un aérosol, en dépit de sa faible efficacité d'échantillonnage pour les particules supérieures à 30 µm (Kenny *et al.*, 1997) et de plusieurs autres limitations (pertes de particules sur les parois intérieures, fuites par contournement du filtre, dépôt non uniforme sur le filtre de collecte et sous-échantillonnage quand l'orifice d'entrée est dirigé vers le bas - Demange *et al.*, 1990 ; Paskar *et al.*, 1991 ; Baron *et al.*, 2002 ; Demange *et al.*, 2002). Historiquement, une « cassette fermée » désigne une cassette présentant un orifice d'aspiration circulaire de 4 mm au lieu d'un orifice qui aurait le diamètre du filtre (on parle alors de « cassette ouverte »). La cassette en polystyrène non-conducteur comportant trois éléments a été conçue avant les autres échantillonneurs testés. Elle reste largement utilisée en raison de sa simplicité et de son faible coût. Elle est généralement utilisée à un débit de 2 l.min⁻¹. Cet échantillonneur était utilisé traditionnellement en France à un débit de 1 l.min⁻¹ pour respecter le critère de vitesse d'aspiration de 1,25 m.s⁻¹ de Ter Kuile (1978, 1984).

L'ACCU-CAP™ n'est pas un échantillonneur autonome mais une capsule d'échantillonnage servant d'accessoire et destinée à être insérée dans une cassette de 37 mm pour éviter les pertes au niveau des parois. Cette capsule est utilisée avec une cassette composée de deux éléments et d'un disque support du filtre. En forme de dôme, la capsule ACCU-CAP™ est moulée dans une matière plastique transparente dissipant les charges statiques et elle est scellée à chaud sur le filtre d'échantillonnage.

Le capteur Bouton (Kalatoor *et al.*, 1995, Aizenberg *et al.*, 1998, 2000a) figure dans cette étude en raison de ses capacités à ne pas échantillonner les très grosses particules pouvant être projetées par les machines à bois (Harper et Muller, 2002 ; Harper *et al.*, 2004). Les particules sont aspirées dans l'échantillonneur à un débit de 4 l.min⁻¹ et recueillies sur un filtre de 25 mm de diamètre. Le capteur Bouton dispose d'une entrée hémisphérique à tamis métallique, qui présente des ouvertures de 381 µm de diamètre, pour l'équivalent de 21 % de la surface d'admission totale. Quelques données de laboratoire ont été publiées sur les caractéristiques de performances du capteur Bouton dans des environnements à faible mouvement d'air.

Nous aurions pu envisager d'autres échantillonneurs pour cette étude, mais ils sont d'un usage limité en France (appareil allemand PGP-GSP - 3,5 l.min⁻¹) ou sont trop compliqués, très récents ou coûteux. L'un d'entre eux est l'échantillonneur individuel RESPICON, qui fonctionne à un débit de 3,1 l.min⁻¹ (Koch *et al.*, 1999, 2002). Cet échantillonneur, moderne et utile, est équipé d'une fente d'entrée annulaire et est donc peu sensible à l'orientation de l'échantillonneur. Le dispositif a été testé par Rando *et al.* (2005) pour l'échantillonnage de poussières de bois. En France, son utilisation n'est pas suffisam-

ment répandue et il ne peut donc trouver place dans les futurs essais sur le terrain. Nous avons cependant mesuré son efficacité dans les conditions du laboratoire, ce qui nous a permis de mieux comprendre les caractéristiques d'un échantillonnage par une fente couverte, notamment dans des conditions d'air calme.

ÉQUIPEMENT DE LABORATOIRE POUR LA MESURE DE L'EFFICACITÉ D'ÉCHANTILLONNAGE

Les configurations et méthodes expérimentales précédemment validées (Witschger, 1996 ; Witschger *et al.*, 1997 ; Roger *et al.*, 1998 ; Roger, 2000, Görner *et al.*, 2008) ont été utilisées pour conduire les travaux expérimentaux décrits dans cette étude. Dans le cas de la fraction inhalable, les conditions de déplacement de l'air au voisinage de l'échantillonneur ont été prises en compte, en raison de leur influence sur l'aspiration des grosses particules. L'inhalabilité des particules s'avère différente dans l'air calme par rapport à ses valeurs dans un air en mouvement (Aitken *et al.*, 1999 ; Brown, 2005). C'est pourquoi l'efficacité d'échantillonnage en fonction de la taille des particules a été mesurée dans un tunnel aéraulique horizontal avec une vitesse de déplacement d'air de 1 m.s⁻¹, ainsi que dans un tunnel aéraulique vertical dans des conditions d'air calme. Un aérosol expérimental de particules sphériques polydispersées a été utilisé.

Le tunnel aéraulique expérimental à 1 m.s⁻¹ transportait horizontalement les particules de l'aérosol de test vers une zone de mesure où étaient exposés successivement les échantillonneurs testés et une sonde de référence.

Le tunnel à air calme fournissait une alimentation verticale descendante des particules de l'aérosol vers une zone de mesure où étaient exposés successivement les échantillonneurs testés et une sonde de référence.

Les aérosols tests étaient produits à partir de poudre de micro-sphères de verre polydispersées, à l'aide d'un générateur d'aérosol à lit fluidisé (Guichard, 1976). Le diamètre aérodynamique médian massique (MMAD) et l'écart type géométrique (GSD) valaient MMAD = 24 µm et GSD = 1,4 dans le tunnel aéraulique horizontal à 1 m.s⁻¹ ; MMAD = 27,5 µm et GSD = 1,6 dans le tunnel vertical à air calme. L'utilisation de particules sphériques permet de surmonter certains problèmes qui

affectent la détermination du diamètre aérodynamique à partir des diamètres volumiques mesurés (Witschger *et al.*, 1997). Un tel aérosol polydispersé permet également de déterminer plusieurs points expérimentaux pour l'efficacité d'échantillonnage sur une vaste plage de diamètres aérodynamiques des particules (de quelques microns à $70 \mu\text{m}$), et cela en une seule expérience.

Des descriptions détaillées des deux tunnels aérauliques et des équipements de laboratoire associés (avec des schémas de principe, ainsi que des détails de l'écoulement de l'air et des paramètres des aérosols de test) sont donnés en *Annexe A*.

Chaque tunnel possède sa propre sonde de référence.

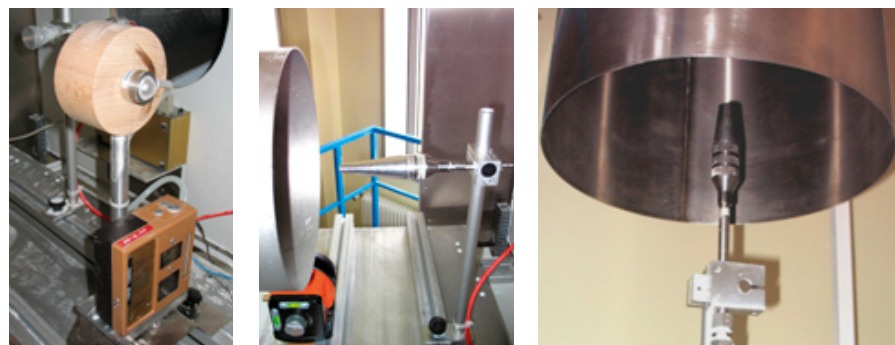
SONDE DE RÉFÉRENCE UTILISÉE DANS LE TUNNEL HORIZONTAL – VITESSE D'AIR 1 M.S⁻¹

La mesure de la concentration de référence C_{ref} de l'aérosol dans un air en mouvement ne pose pas de difficulté car l'utilisation d'une sonde en isocinétisme est courante. Une sonde à bord mince a été utilisée de manière isocinétique pour mesurer la concentration de référence de l'aérosol de test dans la section de mesure du tunnel aéraulique. La sonde de référence mesurait 105 mm de long et le diamètre de son orifice d'aspiration circulaire était de 10,6 mm (*cf. Figure 1b*). Sa section interne conique débouchait sur une surface de filtration de 20 mm de diamètre. Les particules étaient recueillies sur un filtre à membrane Nuclepore de 25 mm de diamètre (taille des pores : $2,0 \mu\text{m}$). Pour récupérer les dépôts sur les parois, la surface interne de la sonde de référence était lavée à l'eau purifiée et la suspension était filtrée sur un deuxième filtre Nuclepore (diamètre 25 mm, pores de $0,8 \mu\text{m}$). Cette procédure garantissait une bonne récupération de tous les dépôts de particules sur les parois. Les sondes récupérées depuis le filtre de la sonde et les dépôts des parois intérieures ont été pesées séparément sur une balance électronique (Mettler Toledo modèle MX5). La masse combinée des particules récupérées sur le filtre primaire de 25 mm plus la masse des dépôts sur les parois a servi à déterminer la concentration de référence en fonction de la taille des particules de l'aérosol, $C_{n,\text{ref}}(D_{ae})$.

La sonde de référence était raccordée à un système comprenant un débitmètre massique régulateur et une pompe à palettes. Pour réaliser un échantillonnage isoci-

FIGURE 1

Photographies des zones de mesure des tunnels aérauliques horizontal et vertical



A Échantillonneur Bouton fixé à un corps factice cylindrique de 110 x 55 mm en rotation à 2 tours/min.
B Sonde de référence utilisée dans le tunnel horizontal, vitesse d'air 1 m.s⁻¹.
C Sonde de référence utilisée dans le tunnel vertical à air calme

nétique, le débit d'air aspiré dans la sonde a été calculé pour chaque test à partir de la surface de l'orifice d'ouverture et de la vitesse moyenne de l'air mesurée dans la section de mesure du tunnel aéraulique. Ce débit d'échantillonnage de référence était de $5,6 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ et a été vérifié avec un débitmètre à bulles Gillibrator[®].

SONDE DE RÉFÉRENCE UTILISÉE DANS LE TUNNEL HORIZONTAL À AIR CALME

Pour l'air calme, la méthode de mesure de référence est délicate et tout échantillonnage isocinétique est impossible. Une solution consiste à utiliser le procédé de sonde pseudo-isocinétique en rotation proposé par Aitken *et al.* (1999), dans lequel une sonde à parois minces est montée sur un bras rotatif, de sorte que la vitesse d'échantillonnage est identique à la vitesse relative entre le capteur tournant et l'air calme. Cependant, cette méthode reste incertaine dans notre cas, en raison de la section de mesure ouverte du tunnel vertical à air calme. La sonde de référence doit être placée sur l'axe du tunnel au même point que l'échantillonneur testé. Toutes les expériences dans le tunnel vertical à air calme ont été conduites avec une sonde de référence cylindrique à parois minces tournée verticalement vers le haut (*cf. Figure 1c*). Cette méthode tient compte de plusieurs critères d'échantillonnage publiés dans la bibliographie (Davies, 1968 ; Ter Kuile, 1979 ; Agarwal et Liu, 1980 ; Ogden, 1983 ; Grinshpun *et al.*, 1990). L'échantillonnage de référence a donc été effectué à l'aide d'une sonde de 76 mm de long (ouverture circulaire de 20 mm de diamètre) à un débit de $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. L'efficacité d'aspiration de ce type de sonde de réf-

érence est comprise entre 90 et 100 % pour un diamètre aérodynamique de particule inférieur à $50 \mu\text{m}$ (calculs théoriques basés sur des modèles décrits dans la bibliographie - Davies, 1977 ; Grinshpun *et al.*, 1993 ; Su et Vincent, 2004). Les modèles divergent pour les plus grosses tailles de particules. Nous avons conduit une simulation mathématique de l'écoulement des particules à l'aide du logiciel Fluent[®]/UNS sur la base d'un maillage bidimensionnel de quadrilatères. Les résultats ont révélé une efficacité supérieure à 90 % jusqu'à $70 \mu\text{m}$, taille limite des particules dans notre expérience. Aitken *et al.* (1999) ont procédé à une comparaison expérimentale d'une sonde statique avec une sonde de référence rotative. Ils ont observé un rapport de concentration de 0,75 (statique : rotatif) pour des particules de $90 \mu\text{m}$. Roger (2000) a effectué la même comparaison jusqu'à $50 \mu\text{m}$ et a obtenu un rapport proche de 1. En combinant ces résultats, on peut dire que, pour des particules de $70 \mu\text{m}$, l'efficacité de la sonde de référence statique pourrait être proche de la valeur calculée par Fluent[®] (85 - 90 %).

MÉTHODE DE MESURE DE L'EFFICACITÉ D'ÉCHANTILLONNAGE

La mesure de l'efficacité d'échantillonnage dans des configurations expérimentales avec tunnel aéraulique et tunnel air calme était basée sur la comparaison de plusieurs concentrations entre l'échantillonneur testé et une sonde de référence, pour différentes tailles de particules. Dans le tunnel aéraulique horizontal et le tunnel vertical à air calme, des échantillonnages du

dispositif testé et de la sonde de référence ont été effectués sur l'axe du tunnel (au centre de la zone de mesure). L'échantillonnage par la sonde de référence se divisait en deux périodes : avant et après la période d'échantillonnage du dispositif étudié. L'uniformité de la concentration numérique des particules dans l'espace et le temps et la distribution des tailles de l'aérosol ont précédemment été vérifiées dans la section de mesure des deux tunnels (Witschger, 1996 ; Witschger *et al.*, 1997 ; Roger, 2000). Pendant chaque expérience, la stabilité de la concentration en aérosol dans les sections de mesure a été mesurée à l'aide d'un compteur optique de particules à 15 canaux (Grimm® 1.108).

Selon l'échantillonneur testé, les particules ont été recueillies sur une membrane Nuclepore de 25 mm (pores de 2,0 µm) ou de 37 mm (pores de 0,8 µm). Le débit d'air d'échantillonnage imposait le recours à des systèmes d'aspiration différents : une pompe à palettes lubrifiée raccordée à un débitmètre massique régulateur, une pompe d'échantillonnage individuelle Gilian Gilair, ou une pompe volumétrique à haut débit (TCR Tecora série Air Guard, modèle Bravo/H2). Les débits nominaux des échantillonneurs ont été mesurés avant chaque expérience à l'aide d'un débitmètre à bulles Gillibrator pour des débits allant jusqu'à 6 l.min⁻¹, ou d'un compteur à gaz Gallus G4 pour les débits supérieurs.

Les filtres ont été pesés avant et après l'échantillonnage des particules à l'aide d'une balance électronique (Mettler Toledo model MX5) afin de déterminer les concentrations massiques échantillonnées. Les particules ont ensuite été récupérées depuis les filtres dans une solution électrolytique Isoton, afin de compter les particules et de déterminer la distribution numérique des tailles de particules par la méthode de comptage Coulter®. Cela nous a permis de calculer les concentrations numériques en fonction de la taille qui avaient été mesurées par l'échantillonneur et par la sonde de référence, respectivement. Enfin, les données expérimentales d'efficacité disponibles dans cet article représentent l'efficacité d'échantillonnage de l'échantillonneur testé en fonction du diamètre aérodynamique des particules (courbe d'efficacité). Une synthèse de la procédure de calcul des efficacités d'échantillonnage en fonction de la taille des particules, précédemment

exposée par Witschger *et al.* (1997) et Görner *et al.* (2000), est donnée en *Annexe B*.

COMMENTAIRES SUR LA FIABILITÉ DES MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Avant de présenter les résultats expérimentaux, nous souhaiterions commenter certaines caractéristiques propres aux méthodes expérimentales utilisées, ainsi que leurs conséquences sur les résultats obtenus pour les différents échantillonneurs. L'efficacité d'échantillonnage expérimental a été mesurée dans des conditions de laboratoire standardisées, qui ne sont pas nécessairement identiques à celles d'un site industriel. Le comportement d'un échantillonneur peut donc différer au laboratoire et sur le lieu de travail (Liden *et al.*, 2000). C'est pourquoi les échantillonneurs ont également été étudiés sur le lieu de travail (Kauffer *et al.*, 2010). Cependant, le recours à des conditions de laboratoire standardisées permet d'étudier et d'évaluer le processus d'échantillonnage pour chaque échantillonneur étudié, et de les comparer les uns aux autres.

CONDITIONS D'AIR EN MOUVEMENT AU LABORATOIRE

La norme EN 13205 (CEN, 2001) recommande l'utilisation d'un mannequin tournant pour les tests d'échantillonneur individuel, afin de réaliser la moyenne des différentes orientations spatiales de l'échantillonneur par rapport au mouvement d'air externe. Cette configuration expérimentale tente de simuler la variabilité des positions de l'échantillonneur sur le poste de travail, en garantissant que l'échantillonneur a été exposé à l'aérosol expérimental selon plusieurs angles différents.

Échantillonneur isolé

Dans le cas d'un échantillonneur isolé (non monté sur un mannequin ou un corps factice), la mesure de l'efficacité de son orifice unidirectionnel en rotation représente une moyenne entre un maximum (dirigé face à l'écoulement d'air) et un minimum (de 90° à 180°) (Li *et al.*, 2000). Un échantillon-

neur ne tourne jamais systématiquement de 0° à 360° sur un poste de travail, de sorte que la valeur mesurée au laboratoire ne représente pas dans l'absolu l'efficacité réelle de l'appareil sur le lieu de travail.

Un échantillonneur présentant une aspiration omnidirectionnelle de l'air possède la même efficacité en rotation ou en position statique. Sur le lieu de travail, on s'attendra donc à travailler avec une efficacité similaire à celle mesurée expérimentalement.

Utilisation d'un mannequin

L'efficacité d'échantillonnage moyenne d'un orifice unidirectionnel est légèrement modifiée lorsqu'on ajoute un mannequin ou un corps factice dans l'expérience. La situation est similaire à celle d'une fente d'échantillonnage omnidirectionnelle, sauf aux angles pour lesquels l'échantillonneur est abrité de l'air en mouvement par le mannequin, car cet effet masquant entraîne une très forte réduction de la quantité d'aérosol échantillonné. Pour un orifice unidirectionnel, cet effet masquant est minimal, car l'orientation de l'échantillonneur lui-même est responsable de la majeure partie de la baisse d'efficacité. Cependant, cette position est rare sur le lieu de travail. L'ouvrier est probablement plutôt tourné vers son outil de travail, plus qu'il ne lui tourne le dos.

On peut s'attendre à ce que l'efficacité sur le lieu de travail obtenue avec des fentes omnidirectionnelles dépasse celle obtenue dans des expériences utilisant un mannequin ou un corps factice tournant. L'efficacité réelle sera probablement proche d'une efficacité expérimentale obtenue avec un mannequin non tournant.

Validité des résultats obtenus avec le corps factice cylindrique utilisé dans cette étude

Une méthode expérimentale standardisée pour mesurer l'efficacité d'un échantillonneur est décrite dans la norme EN 13205 (CEN, 2001). Un tunnel aérodynamique expérimental de grandes dimensions contenant un mannequin grandeur nature est nécessaire. Des débits d'air élevés sont donc nécessaires également et l'on peut s'attendre à des problèmes en termes d'uniformité de concentration et de taille des particules dans cette vaste zone de mesure.

Plusieurs auteurs ont tenté d'atténuer ces problèmes en réduisant les dimensions des équipements expérimentaux sans nuire à leurs résultats (Witschger *et al.*, 1998 ; Ramachandran *et al.*, 1998 ; Kenny *et al.*, 2000 ; Li *et al.*, 2000 ; Aizenberg *et al.*, 2000b, 2001 ; Kennedy *et al.*, 2001 ; Paik et Vincent, 2004). Récemment, Vincent (2006) a proposé une procédure expérimentale améliorée pour tester les échantillonneurs d'aérosol et la norme EN 13205 est actuellement en cours de révision afin de tenir compte des contributions d'autres spécialistes de l'échantillonnage des aérosols.

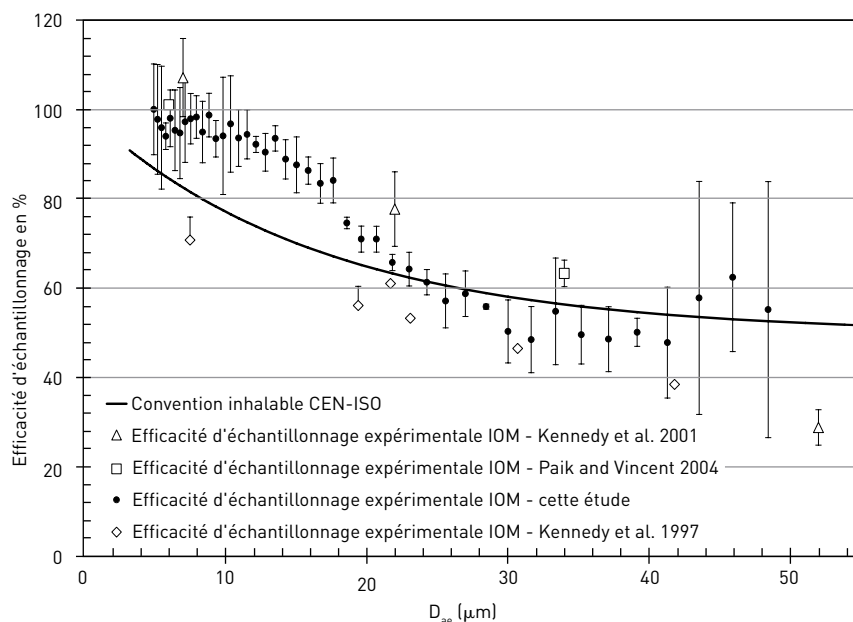
Par exemple, Kennedy *et al.* (2001) ont utilisé un mannequin simplifié pour évaluer les performances d'un échantillonneur IOM. Le mannequin simplifié était construit à partir d'une corbeille en plastique retournée, de 33 cm de large x 20 cm de profondeur x 20 cm de haut, qui a été testée dans un tunnel aéraulique de 1,6 x 1,6 m de section (occupant 2,6 % de la section du tunnel). Des échantillonneurs IOM ont été exposés à des particules de poussières d'oxyde d'aluminium présentant une distribution étroite ($1,16 < GSD < 1,34$) et des diamètres aérodynamiques de 7, 22, 52, 82 et 116 μm . Des résultats, moyennés en fonction de l'orientation, ont été calculés par la moyenne arithmétique des valeurs pour les angles 0°, 90°, 180° et 270° par rapport à la direction du mouvement de l'air (pas de rotation du mannequin pendant l'échantillonnage).

D'autres résultats encourageants ont été obtenus par Paik et Vincent (2004). Dans leur cas, l'échantillonneur était monté sur un corps factice rectangulaire 3D simplifié (120 mm de haut x 120 mm de large x 60 mm de profondeur) qui simulait le mannequin. Ce corps tournait à une vitesse constante de 2 tours/min pour obtenir une moyenne pour une rotation complète de 360°.

Nous avons pu vérifier que les expériences utilisant un corps factice de 110 mm de diamètre et 55 mm de large employé dans cette étude (*cf.* Figure 1a) produisaient des résultats similaires (*cf.* Figure 2). Les données d'efficacité de l'IOM, précédemment obtenues par Kenny *et al.* (1997 ; Kenny, 1995) dans un très grand tunnel aéraulique (10 m de long, 2,5 m de haut et 2,5 m de large) et avec un mannequin de taille réelle, ont également été reportées sur la figure.

FIGURE 2

Comparaison des efficacités d'échantillonnage de l'IOM en fonction du diamètre aérodynamique des particules mesurées



- (i) dans un grand tunnel aéraulique décrit par Kennedy *et al.* (2001) (triangles vides, mannequin simplifié, vitesse d'air 1 m.s⁻¹, échantillons prélevés suivant quatre angles par rapport à la direction du flux d'air, aérosol d'oxyde d'aluminium quasi-monodispersé avec GSD < 1,34) ;
- (ii) dans un tunnel aéraulique décrit par Paik et Vincent (2004) (carrés vides, corps factice rectangulaire en rotation à 2 tours/min, vitesse d'air 1 m.s⁻¹, aérosol de d'alumine quasi-monodispersée avec GSD < 1,30) ;
- (iii) dans le tunnel aéraulique de la présente étude (cercles pleins, corps factice cylindrique en rotation à 2 tours/min, vitesse d'air 1 m.s⁻¹, aérosol de sphères de verre polydispersé) ;
- (iv) dans un grand tunnel aéraulique décrit par Kenny *et al.* (1997) (losanges vides, mannequin grandeur nature en rotation à 2 tours/min, vitesse d'air 1 m.s⁻¹, aérosol d'aloxite quasi-monodispersé avec GSD compris entre 1,28 et 1,52) (les barres d'erreur correspondent au coefficient de variation de la moyenne arithmétique calculée à partir d'au moins trois essais expérimentaux).

CONDITIONS D'AIR CALME AU LABORATOIRE

Des conditions d'air strictement calme sont obtenues dans le tunnel destiné à étudier cette configuration, de sorte que les particules se déplacent verticalement vers le bas. La Figure 3 montre que l'échantillonneur Bouton peut échantillonner des particules qui rentre directement à l'intérieur de l'échantillonneur par sédimentation puisqu'il est partiellement dirigé vers le haut. L'échantillonneur IOM et la cassette fermée aspirent les particules horizontalement et les dévient à 90° par rapport à leur trajectoire verticale initiale. Par rapport à l'orifice plus grand de l'IOM, l'orifice nettement plus petit de la cassette nécessite une déviation de trajectoire plus brusque pour que les particules soient aspirées dans le dispositif (*cf.* Figure 3).

La fente d'échantillonnage horizontale du CIP est partiellement couverte par un chapeau protecteur qui empêche l'échantillonnage non souhaité de particules projetées. Des particules parcou-

rant des trajectoires descendantes parfaitement verticales doivent ainsi être déviées à 180°, donc se déplacer presque verticalement vers le haut pour être prélevées. Cela peut expliquer les différences observées dans les résultats d'échantillonnage des particules avec les dispositifs testés dans un air totalement calme (voir la section Résultats). Cet effet a été vérifié à l'aide d'un échantillonneur RESPICON équipé d'une fente d'échantillonnage similaire, partiellement masquée. Dans ces conditions, son efficacité diminue aussi rapidement quand la taille des particules augmente (*cf.* Figure 11).

Des conditions d'air parfaitement calmes sont très improbables sur un lieu de travail, même si l'on considère qu'il n'y a pas de vent, en raison des turbulences créées par les ouvriers et les procédés. Dans le cas d'un échantillonnage individuel, le mouvement de l'opérateur portant l'échantillonneur rend impossible l'obtention de conditions correspondant à des particules qui tomberaient exclusivement vers le bas pour

FIGURE 3

Trajectoires des particules au voisinage de l'entrée d'aspiration des échantillonneurs dans le tunnel vertical à air calme

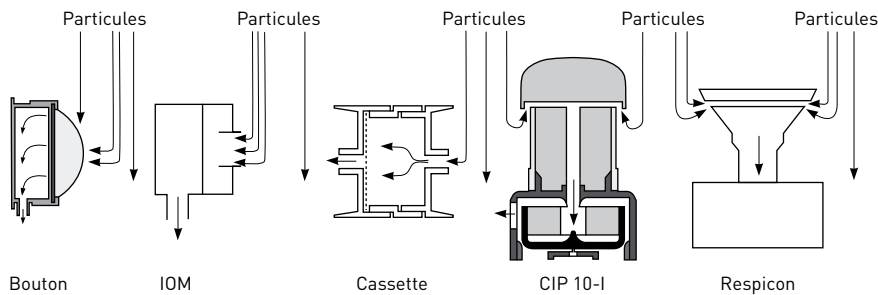


FIGURE 4

Échelle de vitesses d'air rencontrées sur la majorité des lieux de travail, avec les conditions les plus fréquentes décrites par Baldwin et Maynard (1998).

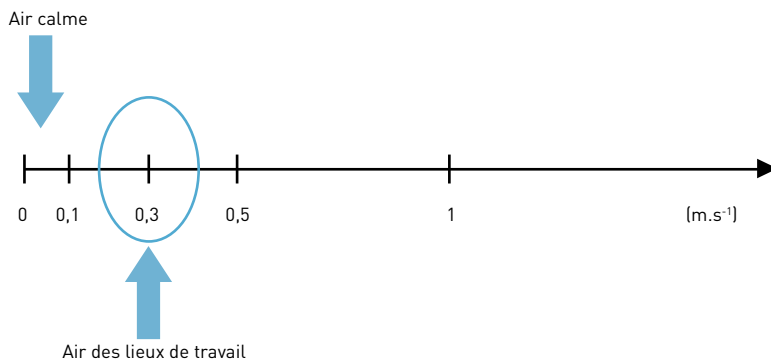


TABLEAU II

Coefficients de variation minimum (Cv_{min}), moyen (Cv_{moy}) et maximum (Cv_{max}) calculés pour les points expérimentaux figurant sur les courbes d'efficacité d'échantillonnage

Échantillonneurs	Débit (l.min ⁻¹)	Tunnel horizontal			Tunnel vertical		
		Vitesse d'air = 1 m.s ⁻¹			Air calme		
		Cv_{min} (%)	Cv_{moy} (%)	Cv_{max} (%)	Cv_{min} (%)	Cv_{moy} (%)	Cv_{max} (%)
Échantillonneur IOM	2	0,51	5,20	26,05	1,45	7,76	38,50
Échantillonneur Bouton	4	1,41	8,34	22,22	1,46	6,71	20,69
CIP 10-I v1	10	1,76	10,30	32,18	2,59	10,30	50,14
CIP 10-I v2	10	0,50	7,37	33,24	1,22	7,69	30,01
Cassette fermée 37 mm	1	0,89	7,93	33,00	1,77	15,69	55,34
ACCU-CAP™	1	0,26	10,05	25,23	0,89	8,02	51,55

rapport à l'échantillonneur. Pour toutes ces raisons, l'efficacité en air calme dans des conditions de travail est, à n'en pas douter, supérieure à l'efficacité en air parfaitement calme mesurée au laboratoire. Baldwin et Maynard (1998) ont décrit des conditions de travail fréquemment rencontrées (80 %), dans lesquelles l'air est en léger mouvement. En termes d'échantillonnage des particules, il ne s'agit pas réellement d'air calme

(cf. Figure 4), mais on est loin également d'un vent de 1 m.s⁻¹ ou plus (Liden et Harper, 2006). Le fait d'échantillonner un air en léger mouvement atténue les différences entre les efficacités d'échantillonneurs utilisés dans un air strictement calme et celles d'échantillonneurs utilisés dans des courants d'air à vitesse ultra-faible (Schmees *et al.*, 2008; Sleeth et Vincent, 2009) ou sur le lieu de travail (Kauffer *et al.*, 2010).

Enfin, on peut dire que les expériences de laboratoire en air en mouvement ou calme, même quand elles sont conçues pour constituer un modèle idéal de l'échantillonnage sur le lieu de travail, ont un impact différent sur chaque type d'échantillonneur. Cela signifie que l'efficacité d'échantillonnage dépend des conditions expérimentales et que des conditions expérimentales particulières n'ont pas le même effet sur tous les types d'échantillonneurs.

Les efficacités expérimentales obtenues en laboratoire ne correspondent pas exactement aux performances des échantillonneurs sur le lieu de travail, mais elles permettent de comparer le comportement de différents échantillonneurs dans des conditions contrôlées, en s'appuyant sur des paramètres connus. Cela contribue à une meilleure compréhension du processus d'échantillonnage.

RÉSULTATS

Résultats des efficacités d'échantillonnage expérimentales en fonction de la taille des particules dans l'air en mouvement et l'air calme

Les courbes de données expérimentales relatives aux efficacités d'échantillonnage pour différentes tailles de particules sont présentées ici. Chaque figure correspond à un échantillonneur testé et présente des données expérimentales relevées dans l'air en mouvement et dans l'air calme. Les symboles suivants sont utilisés - carrés vides : air en mouvement, échantillonneur fixé sur un corps factice cylindrique, vitesse de rotation 2 tours/min, vitesse de l'air 1 m.s⁻¹ ; carrés pleins : air calme, pas de corps factice. Ces données ont été lissées par une fonction polynomiale du quatrième degré approximant les points expérimentaux de chaque figure (courbes en gris clair). Ces courbes représentent la tendance approchée de l'efficacité en fonction de la taille des particules. Le modèle choisi suit correctement la plupart des résultats expérimentaux et aide visuellement à évaluer la tendance des efficacités mesurées et à les comparer. Le modèle lissé n'a été utilisé ni à des fins d'extrapolation ni en vue de calculs. Chaque figure montre également la courbe conventionnelle de la fraction inhalable CEN-ISO (traits pleins) et les inhala-

bilités expérimentales (traits pointillés courts et traits pointillés longs, obtenues par Aitken *et al.* (1999) dans des conditions d'air en faible mouvement pour des débits d'inhalation de 20 et 10 l.min⁻¹, respectivement).

Un intervalle d'erreur a été calculé au niveau de confiance de 95 % pour chaque valeur de l'efficacité et représente le coefficient de variation de la moyenne arithmétique calculée à partir de trois essais expérimentaux. Cependant, par souci de lisibilité des figures, nous n'avons pas porté les barres d'erreur autour des points expérimentaux. Le lecteur pourra apprécier la reproductibilité des résultats expérimentaux dans le *Tableau II*, dans lequel des coefficients de variation minimum, moyen et maximum sont indiqués pour chaque échantillonneur et pour les deux conditions expérimentales. Le lecteur pourra également estimer la plage de valeur des barres d'erreur sur la *Figure 2*, où un exemple de données expérimentales d'efficacité est porté avec ses coefficients de variation, en fonction du diamètre aérodynamique des particules. Seuls 7,2 % de tous les points expérimentaux portés sur les sept figures suivantes (tous les échantillonneurs et les deux tunnels) sont associés à un coefficient de variation supérieur à 20 %. La plupart de ces points correspondent à des diamètres de particules supérieurs à 40 µm, en raison du faible nombre de ces particules dans l'aérosol.

Il faut noter que l'échantillonneur CIP 10-I n'a pas été testé avec son étage collecteur conventionnel (coupelle rotative avec filtre en mousse). Les têtes d'échantillonnage de la fraction inhalable ont été montées sur un support de filtre afin de recueillir les particules sur un filtre à membrane Nuclepore, ce qui facilite la récupération des particules en vue de l'analyse ultérieure de leurs tailles. Dans ce système, le débit était maintenu à 10 l.min⁻¹ par une pompe externe. La sélectivité de la tête d'échantillonnage était donc inchangée et la récupération des particules collectées pour en analyser la distribution des tailles était considérablement simplifiée.

Le système ACCU-CAPTM ne permettait pas de récupérer les particules pour les analyser. Nous avons utilisé la cassette fermée en trois parties et le filtre conventionnels. Cependant, les particules déposées sur les surfaces intérieures de la cassette, qui sont logiquement

recueillies dans la capsule ACCU-CAPTM, ont été récupérées par lavage à l'eau et filtration du liquide sur une membrane Nuclepore de 25 mm de diamètre (pores de 0,8 µm). Ce protocole assurait que toutes les particules aspirées dans la cassette de 37 mm étaient effectivement prises en compte dans l'analyse de la distribution des tailles.

On peut comparer les efficacités d'échantillonnage expérimentales avec la courbe conventionnelle de la fraction inhalable CEN-ISO-ACGIH (1993-95). L'inhalabilité des particules dans un air calme est représentée des droites (traits en pointillés), d'après Aitken *et al.* (1999). Ces courbes montrent que l'efficacité d'aspiration dans des environnements à faible mouvement d'air est supérieure à celle spécifiée par la convention actuelle. Elles ne représentent pas d'accord conventionnel et ne doivent être considérées qu'en tant que comparaison qualitative avec les données expérimentales d'efficacité pour un échantillonneur testé en air calme. Les inhalabilités conventionnelles et en air calme ont été mesurées à l'aide d'un modèle de tête humaine présentant une respiration orale (Vincent *et al.*, 1990 ; Aitken *et al.*, 1999). Dans le cas des poussières de bois, la respiration nasale est importante pour l'effet sanitaire critique dû à ces poussières, à savoir le cancer du nez. Nous considérons qu'en respiration oronasale, le débit se divise entre ces deux voies et l'inhalabilité résultante est inférieure à l'inhalabilité par voie orale seulement. C'est pourquoi nous avons porté les courbes d'inhalabilité d'Aitken à la fois pour un grand débit (20 l.min⁻¹) et un plus petit débit (10 l.min⁻¹), considérant que l'inhalabilité applicable aux poussières de bois pouvait se situer entre ces deux lignes, sans doute plus près de la courbe 10 l.min⁻¹, ou même plus bas.

Les critères d'échantillonnage d'aérosol existants font maintenant l'objet de discussions au niveau international (Vincent, 2005) et au sein des organismes de normalisation CEN et ISO. Ce processus doit améliorer les réglementations pour tirer parti des nouvelles connaissances scientifiques en matière d'inhalation des aérosols. Seule la convention d'échantillonnage de la fraction inhalable existante et l'inhalabilité d'Aitken ont été retenues pour la comparaison avec les résultats expérimentaux en termes d'efficacité des échantillonneurs testés.

Les efficacités expérimentales des échantillonneurs d'aérosol inhalables testés sont portées sur les *Figures 5 à 11*.

DISCUSSION

Efficacités d'échantillonnage expérimentales en fonction de la taille des particules

La procédure d'essai de laboratoire employée dans l'air en mouvement pour mesurer les performances d'échantillonneurs individuels de la fraction inhalable est similaire à la méthode de test décrite dans la norme EN 13205 (CEN, 2001). Le nombre de grosses particules dans la zone de mesure du tunnel aérodynamique horizontal était un peu faible pour autoriser une analyse statistiquement significative. Les erreurs expérimentales ont été jugées trop importantes pour pouvoir exploiter les résultats pour les grosses particules et les données n'ont donc été analysées que jusqu'à $D_{ae} \approx 50 \mu\text{m}$.

La mesure des performances d'échantillonneurs individuels de la fraction inhalable dans le tunnel vertical en air calme apporte des résultats complémentaires. Ces données donnent des informations sur le comportement de l'échantillonneur dans des conditions d'air parfaitement calme. Les résultats expérimentaux sont exploités jusqu'à $D_{ae} \approx 70 \mu\text{m}$.

Les *Figures 5 à 11* montrent que l'échantillonneur IOM et la nouvelle version de l'échantillonneur CIP 10-I (v2) présentent, pour un air en mouvement de 1 m.s⁻¹, les courbes expérimentales de l'efficacité d'échantillonnage qui coïncident le mieux avec la courbe conventionnelle CEN-ISO (cf. *Figures 5 et 8*). Ce fait est corroboré par les résultats expérimentaux de mesure de la concentration massique de particules (cf. *Tableau III*).

L'efficacité expérimentale de la dernière version de l'échantillonneur CIP 10-I v2 est sensiblement meilleure que celle de la version précédente (v1) (cf. *Figures 7 et 8*). Certaines pertes de particules ont été détectées par Kenny *et al.* (1997 ; Kenny, 1995) dans la version d'origine (v1). Dans la nouvelle version (v2), la suppression de six orifices circulaires situés sous le chapeau protecteur a considérablement amélioré l'efficacité de la transmission entre la fente d'aspiration annulaire et l'étage de

FIGURE 5

Efficacités d'échantillonnage de l'échantillonneur IOM (2 l.min⁻¹) en fonction du diamètre aérodynamique des particules collectées.

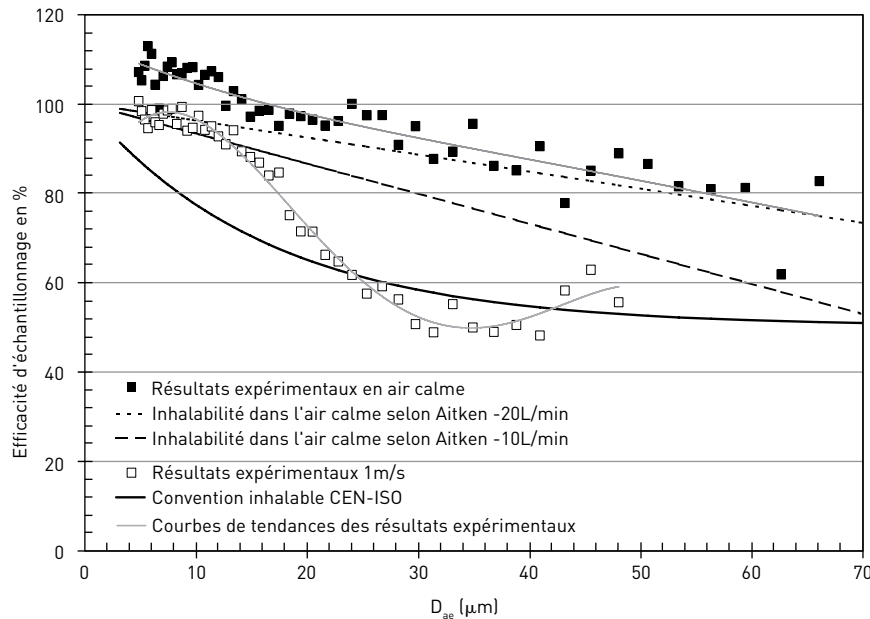
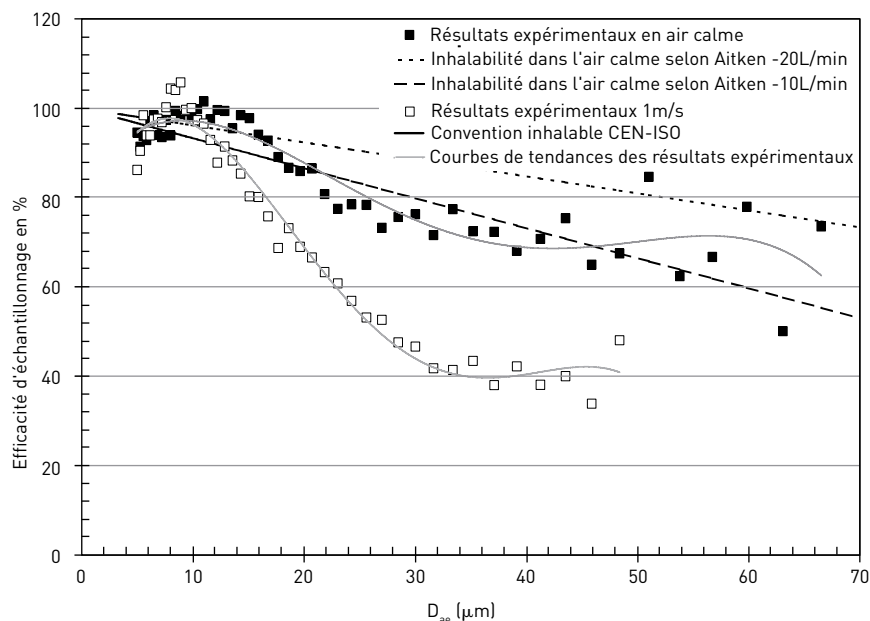


FIGURE 6

Efficacités d'échantillonnage de l'échantillonneur Bouton (4 l.min⁻¹) en fonction du diamètre aérodynamique des particules collectées.



collecte du CIP 10-I. La mise au point du nouvel échantillonneur CIP 10 est décrite en détail par Görner *et al.* (2009).

Les résultats pour l'efficacité de l'échantillonneur Bouton (*cf.* Figure 6) ne sont que légèrement inférieurs à ceux des appareils IOM et CIP 10-I v2. Les valeurs expérimentales sous-estiment la courbe conventionnelle CEN-ISO pour les diamètres de particules $D_{ae} > 25 \mu\text{m}$ et cette tendance s'avère

plus prononcée que pour les deux échantillonneurs précédents. Une certaine proportion de grosses particules risque de ne pas être transmise jusqu'au filtre de collecte et peut se trouver piégée par la grille d'entrée (autour ou dans les nombreux orifices équidistants de $381 \mu\text{m}$ de diamètre, qui représentent 21 % de la porosité d'entrée - Aizenberg, 2000a).

L'efficacité d'échantillonnage pour la cassette fermée de 37 mm présente les moins bons résultats parmi les méthodes examinées (*cf.* Figure 9). Les points expérimentaux pour les diamètres de particule $D_{ae} > 20 \mu\text{m}$ sous-estiment grandement la courbe conventionnelle CEN-ISO et l'inhalabilité en air calme d'Aitken. Le Tableau III confirme que la cassette fermée est l'échantillonneur qui donne également le plus faible rapport de concentrations massiques.

L'efficacité d'échantillonnage de l'appareil ACCU-CAP™ insérée dans une cassette de diamètre 37 mm est supérieure à celle de la cassette sans ACCU-CAP™ (*cf.* Figure 10). L'efficacité d'échantillonnage avec ACCU-CAP™ est similaire à l'efficacité d'aspiration de l'orifice de cassette de 4 mm, qui est logiquement supérieure à l'efficacité d'échantillonnage globale de la cassette, du fait des pertes sur les parois.

Dans l'air calme, l'échantillonneur IOM suit correctement l'inhalabilité d'Aitken obtenu avec un débit de 20 l.min⁻¹.

L'efficacité du CIP 10-I v2 est à nouveau nettement supérieure à celle de la version 1. Le chapeau supérieur prodigue un effet « parapluie » ou d'écran au-dessus de l'entrée, ce qui apporte un effet protecteur vis-à-vis de particules projetées indésirables. Par contre, dans des conditions d'air calme strictes, caractérisées par des particules en chute verticale libre vers le bas, le chapeau protecteur provoque une baisse de l'efficacité. Cet effet a été discuté précédemment dans la section Conditions de laboratoire en air calme et s'observe également avec l'échantillonneur RESPICON (*cf.* Figure 11) en raison de sa fente d'aspiration également protégée (*cf.* Figure 3).

L'efficacité en laboratoire de l'échantillonneur Bouton est proche de l'inhalabilité d'Aitken à un débit de 10 l.min⁻¹.

Comme dans l'air en mouvement, l'efficacité de la cassette fermée est la plus faible de tous les échantillonneurs testés. L'utilisation de la capsule ACCU-CAP™ améliore cependant ses performances.

FIGURE 7

Efficacités d'échantillonnage de l'échantillonneur CIP 10-I v1 (10 l.min⁻¹) en fonction du diamètre aérodynamique des particules collectées.

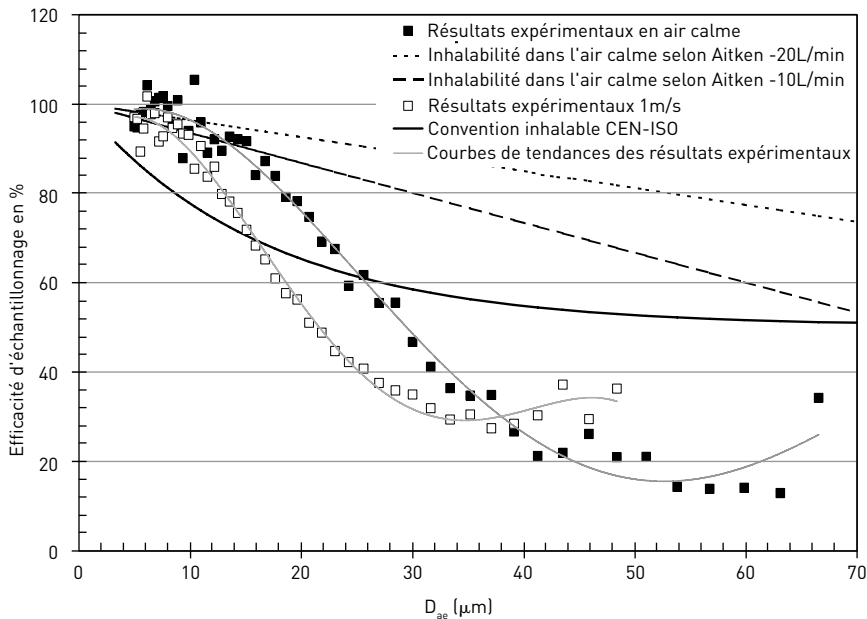
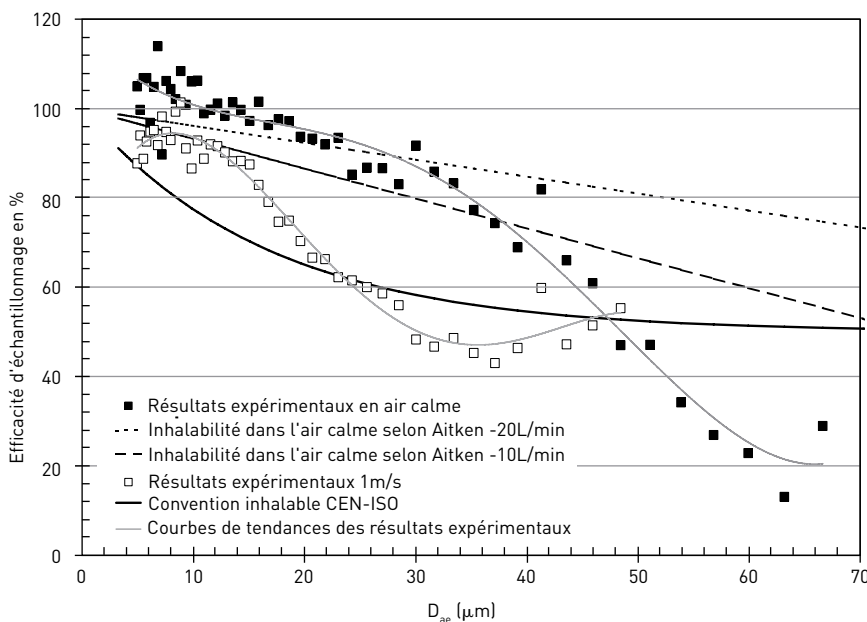


FIGURE 8

Efficacités d'échantillonnage de l'échantillonneur CIP 10-I v2 (10 l.min⁻¹) en fonction du diamètre aérodynamique des particules collectées.



Rapport expérimental des concentrations massiques de particules entre fraction inhalable et aérosol total

La concentration massique mesurée par chaque échantillonneur a été divisée par la concentration massique de la sonde de référence pour obtenir une fraction d'aérosol qui est notée $f_{m,s,sampler}$. Elle correspond à la «fraction inhalable» mesurée par l'échantillonneur et peut être comparée à la «fraction réelle d'aérosol inhalable» présente dans le tunnel.

Cette dernière est déduite de la concentration totale en aérosol mesurée par la sonde de référence, en utilisant la distribution de tailles de l'aérosol et la définition mathématique de l'inhalabilité.

Les rapports de concentrations massiques de particules f_m sont calculés en utilisant l'équation suivante :

$$f_{m,s,sampler} = \frac{C_{m,s,sampler}}{C_{m,a,ref}} \quad (1)$$

avec $C_{m,s,sampler}$: concentration massique de

particules échantillonnées (s - «sampled») par l'échantillonneur testé ($mg.m^{-3}$); $C_{m,a,ref}$: concentration massique de particules aspirées (a) dans la sonde de référence ($mg.m^{-3}$).

Les concentrations massiques de particules ont été calculées à l'aide de l'équation suivante :

$$C_{m,j,x} = \frac{M_x^{part}}{V_x^{air}} \quad (2)$$

x = sampler pour l'échantillonneur testé

$j = s$

$x = ref$ pour la sonde de référence $j = a$

avec M_x^{part} : masse de particules échantillonnées par l'échantillonneur testé ou aspirées par la sonde de référence ; V_x^{air} : volume d'air échantillonné pendant le test (m^3).

La valeur correspondant à la fraction inhalable conventionnelle dans le tunnel d'air en mouvement est calculée à partir de la distribution expérimentale des tailles de l'aérosol (cf. Figure A3) et de l'équation de la courbe conventionnelle $E(D_{ae}) = 0,5 \times [1 + \exp(-0,06 \times D_{ae})]$ (Görner et Fabries, 1996). Comme le montre le Tableau 3, cette valeur est égale à $f_{m,convention\ CEN-ISO} = 61,8\%$ et peut être comparée aux rapports de concentrations massiques obtenus pour les échantillonneurs dans le tunnel horizontal.

Le même type de calcul a été mené pour le tunnel air calme à partir de l'équation d'inhalabilité expérimentale en air calme de Aitken pour un débit de $20\ l.min^{-1}$ ($E(D_{ae}) = 1 - 0,0038 \times D_{ae}$) et de la distribution des tailles de l'aérosol dans ce tunnel (cf. Figure A5). Dans ce cas, la valeur du rapport vaut $f_{m,inhalabilité\ d'Aitken\ air\ calme} = 87,9\%$; on peut la comparer aux rapports de concentrations massiques obtenus pour les échantillonneurs dans le tunnel à air calme.

Le Tableau III donne les rapports de concentrations massiques de particules obtenus pour chaque échantillonneur dans les deux tunnels, pour les aérosols de billes de verre utilisés. Chaque valeur indiquée représente la moyenne de trois mesures expérimentales de la concentration de l'aérosol.

FIGURE 9

Efficacités d'échantillonnage de la cassette fermée de 37 mm ($1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) en fonction du diamètre aérodynamique des particules collectées

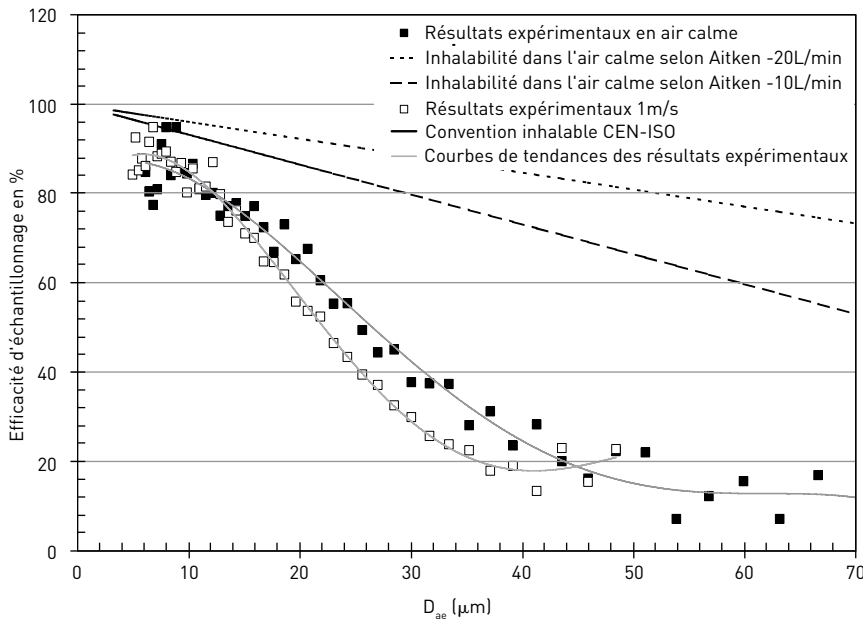
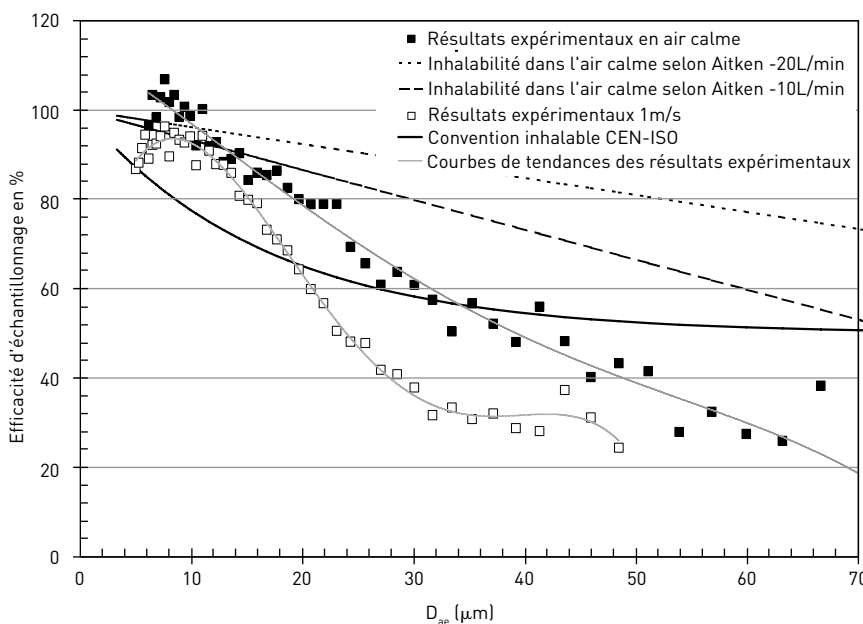


FIGURE 10

Efficacités d'aspiration de la cassette fermée de 37 mm ($1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) en fonction du diamètre aérodynamique des particules collectées (similaire aux efficacités d'échantillonnage de l'ACCU-CAP™)



Discussion sur les rapports expérimentaux de concentrations massiques en particules

Les valeurs de f_m sont supérieures dans l'air calme à celles dans l'air en mouvement à $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, sauf pour la cassette fermée. Une classification des échantillonneurs basée sur les rapports de concentrations massiques des particules est différente pour l'air en mouvement et l'air calme (cf. *Tableau III*). L'échantillonneur

Bouton se classe deux rangs plus haut dans l'air calme, sans doute en raison de son orientation partiellement vers le haut, comme l'explique la *Figure 3*.

Indépendamment des conditions opératoires, l'échantillonneur IOM présente les plus forts rapports de concentrations massiques (cf. *Tableau III*). Cependant, l'échantillonneur IOM surestime aussi bien la concentration massique en particules inhalables qui serait obtenue par

un échantillonneur idéal capable d'échantillonner l'aérosol de billes de verre avec la même efficacité que celle de la courbe conventionnelle CEN-ISO pour de l'air en mouvement ($f_{m,convention\ CEN-ISO} = 61,8 \%$), que la courbe d'inhalabilité obtenue par Aitken *et al.* (1999) dans de l'air calme pour un débit d'inhalation de $20 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ($f_{m,inhalabilité\ d'Aitken\ air\ calme} = 87,9 \%$).

Il faut noter que le rapport de concentrations massiques des particules obtenu avec le CIP 10-I v2 dans le tunnel horizontal ($63,0 \%$) est très proche de la valeur attribuée à un échantillonnage précis conformément à la convention CEN-ISO ($61,8 \%$).

La différence de performances de la cassette fermée, avec ou sans l'ACCU-CAP™, est démontrée clairement par les rapports du *Tableau III* : les rapports de concentrations entre la cassette et l'ACCU-CAP™ sont sensiblement supérieurs quand les pertes sur les parois sont récupérées par l'ACCU-CAP™ et les différences atteignent $\sim 10 \%$ dans l'air en mouvement et $\sim 20 \%$ dans l'air calme.

Performances de la cassette fermée de 37 mm et de l'ACCU-CAP™ vis-à-vis du débit d'échantillonnage

Une cassette fermée présentant un orifice d'échantillonnage de 4 mm est utilisée dans de nombreux pays avec un débit de $2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. En France, ce capteur était souvent employé à $1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ pour respecter le critère d'échantillonnage de ter Kuile (1979). Nous avons examiné la différence de concentration échantillonnée pour ces deux débits. Le *Tableau IV* contient les rapports de concentrations massiques de particules pour la cassette fermée de 37 mm de diamètre et pour l'ACCU-CAP™, en fonction du débit d'échantillonnage et des conditions d'air extérieures. Ces rapports ont été calculés de la même façon que dans la section précédente, à partir de la distribution des tailles de particules dans l'aérosol test.

Rapport de concentrations massiques des particules échantillonnées (recueillies sur le filtre de la cassette) :

$$f_{m,s,cass.} = \frac{C_{m,s,cass.}}{C_{m,a,ref.}} \quad (3)$$

avec $C_{m,s,cass.}$: concentration massique des particules échantillonnées par la cassette de 37 mm ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) ;

$C_{m,a,ref.}$: concentration massique des particules aspirées par la sonde de référence ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$).

FIGURE 11

Efficacités d'échantillonnage de l'échantillonneur RESPICON (3,1 l.min⁻¹) en fonction du diamètre aérodynamique des particules collectées.

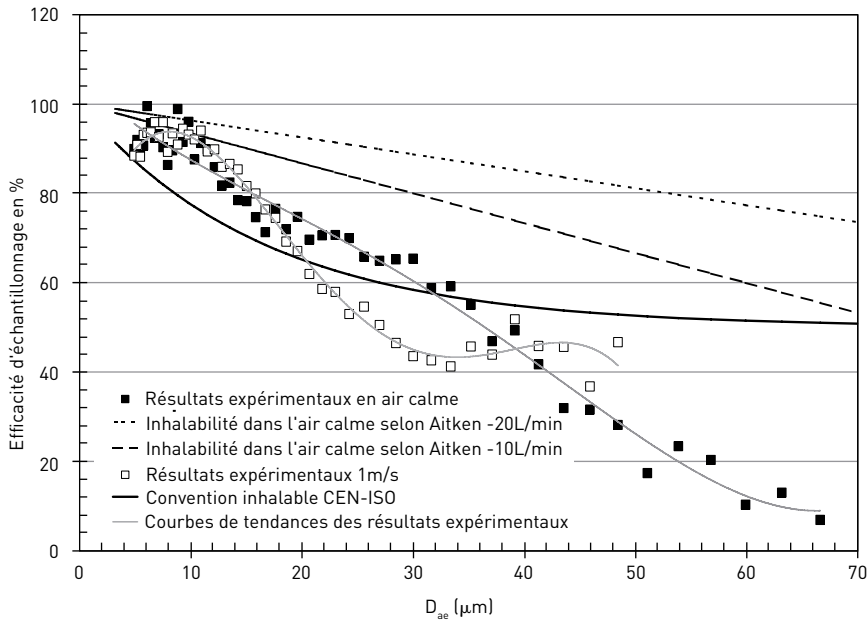


TABLEAU III

Rapport des concentrations massiques de particules (concentration de l'échantillonneur testé sur la concentration de la sonde de référence) obtenus dans deux tunnels de laboratoire avec un aérosol de sphères de verre (Cv(f_{m,s,sampler}) = coefficient de variation basé sur trois essais expérimentaux)

Tunnel horizontal – vitesse d'air= 1 m.s ⁻¹			Tunnel vertical - air calme		
f _{m,s,sampler} (%)	Cv(f _{m,s,sampler}) (%)	Échantillonneur	Échantillonneur	f _{m,s,sampler} (%)	Cv(f _{m,s,sampler}) (%)
67,0	2,1	Échantillonneur IOM	Échantillonneur IOM	92,0	10,0
63,0	3,5	CIP 10-I v2	Échantillonneur Bouton	78,2	2,3
52,5	6,8	ACCU-CAP™	CIP 10-I v2	75,4	4,5
50,9	9,5	Échantillonneur Bouton	ACCU-CAP™	60,8	7,3
45,1	10,5	CIP 10-I v1	CIP 10-I v1	51,9	5,0
42,7	1,9	Cassette fermée 37 mm	Cassette fermée 37 mm	41,6	8,4
61,8	-	Convention inhalable CEN-ISO	Inhalabilité en air calme selon Aitken - 20 l.min ⁻¹	87,9	-

Rapport de concentrations massiques des particules aspirées (recueillies sur le filtre de la cassette et sur les surfaces intérieures de la cassette) :

$$f_{m,a,cass.} = \frac{C_{m,a,cass.}}{C_{m,a,ref}} \quad (4)$$

(L'équation (4) est similaire à

$$f_{m,s,ACCU-CAP^{TM}} = \frac{C_{m,s,ACCU-CAP^{TM}}}{C_{m,a,ref}}$$

avec C_{m,a,cass.} : concentration massique des particules aspirées (a) dans la cassette de diamètre 37 mm (mg.m⁻³) ;

C_{m,s,ACCU-CAP™} : concentration massique des particules échantillonnées (s) par l'ACCU-CAP™ (mg.m⁻³) ; C_{m,a,ref.} : concentration massique des particules aspirées (a) par la sonde de référence (mg.m⁻³) ; C_{m,a,cass.} = C_{m,s,cass.} + C_{m,d,cass.} ; C_{m,d,cass.} : concentration massique des particules déposées (d) sur les surfaces intérieures de la cassette (mg.m⁻³).

Cv(f_{m,s,cass.}) et Cv(f_{m,a,cass.}) sont les coefficients de variation pour le rapport f_{m,s,cass.} et pour le rapport f_{m,a,cass.} sur la base de trois essais expérimentaux.

Discussion des performances de la cassette fermée et de l'ACCU-CAP™ vis-à-vis du débit

Le Tableau IV montre la très faible sensibilité de la cassette fermée de diamètre 37 mm vis-à-vis d'un changement de débit de 1 à 2 l.min⁻¹. Dans des conditions de fonctionnement données, les performances de la cassette et de l'ACCU-CAP™ sont peu influencées par cette modification. Avec une vitesse de l'air de 1 m.s⁻¹, les efficacités d'aspiration de la cassette pour des débits de 1 et 2 l.min⁻¹ ne diffèrent jamais de plus de 30 % sur l'intervalle de tailles de particules étudié. Sur le lieu de travail, Kauffer *et al.* (2010) ont obtenu des résultats qui confirment la faible sensibilité de la cassette pour une variation du débit de 1 à 2 l.min⁻¹.

Les valeurs du Tableau IV sont bien sûr supérieures quand toutes les particules aspirées sont prises en compte (filtre + dépôts sur les parois), par rapport aux valeurs correspondant aux seules particules recueillies sur le filtre. Ces résultats confirment que l'utilisation d'une capsule ACCU CAP™ augmente effectivement l'efficacité d'échantillonnage globale de la cassette fermée.

Performances de la cassette fermée de 37 mm de diamètre en fonction de l'inclinaison de l'orifice d'entrée

L'utilisation de la cassette fermée de 37 mm de diamètre est décrite dans la norme NF X 43-257 (AFNOR, 2008), qui spécifie que l'axe de l'orifice d'entrée doit être orienté horizontalement pendant l'échantillonnage. En pratique, cependant, la cassette est souvent utilisée avec l'axe de son orifice d'entrée incliné vers le bas et typiquement suspendue sur son tube de prélèvement d'air au-dessus de l'épaule de l'ouvrier (généralement appelée « position à 45° », bien que cet angle puisse varier énormément).

La Figure 12 nous permet de comparer l'efficacité d'aspiration d'une cassette orientée horizontalement et d'une cassette inclinée à 45°, efficacité mesurée dans le tunnel vertical en air calme. Chaque point de données représente une valeur moyenne sur trois essais expérimentaux.

Kenny *et al.* (1999) ont également mesuré l'efficacité d'échantillonnage d'une cassette fermée de 37 mm de diamètre dans un air en faible mouvement. L'entrée de la cassette était orientée selon un angle de 45°. Des mesures ont été effectuées avec

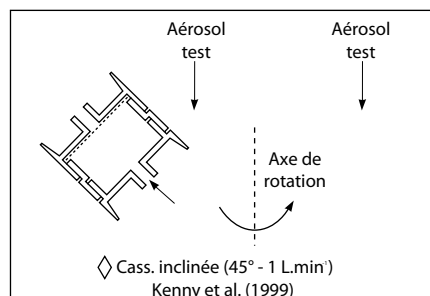
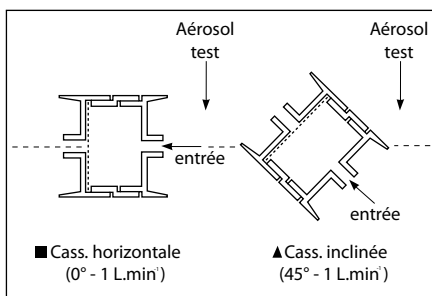
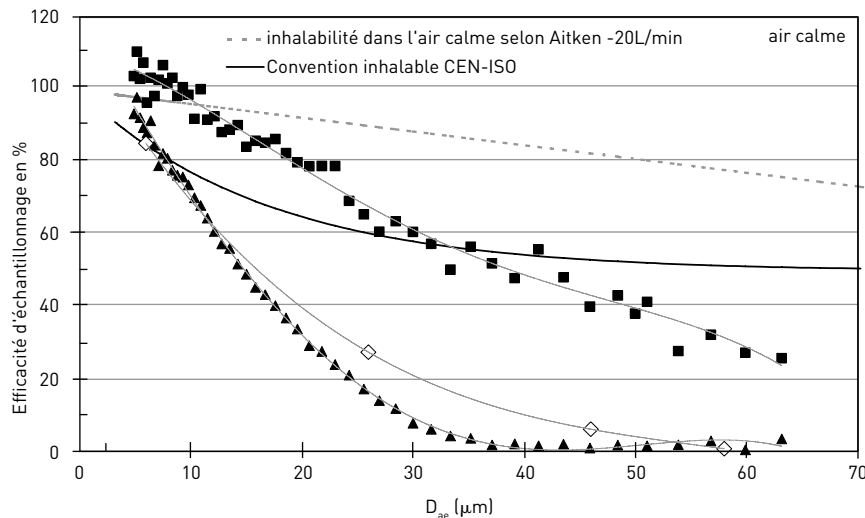
TABLEAU IV

Comparaison des rapports de concentrations massiques de particules échantillonnées ($f_{m,s,cass}$) et aspirées ($f_{m,a,cass}$) avec la cassette fermée de 37 mm pour deux débits différents (1 et 2 l.min⁻¹) et pour des conditions d'air en mouvement (1 m.s⁻¹) et d'air calme. $Cv(f_{m,s,cass})$ et $Cv(f_{m,a,cass})$ sont le coefficient de variation pour le rapport $f_{m,s,cass}$ et le coefficient de variation pour le rapport $f_{m,a,cass}$ sur la base de trois essais expérimentaux.

Tunnel	Tunnel horizontal – vitesse = 1 m.s ⁻¹		Tunnel vertical – air calme	
Débit d'air de prélèvement (l.min ⁻¹)	1	2	1	2
Rapport cassette (%), $f_{m,s,cass}$ ($Cv(f_{m,s,cass})$)	42,7 (1,26)	44,5 (2,19)	41,6 (5,84)	42,0 (11,39)
Rapport ACCU-CAP™ (%), $f_{m,a,cass}$ ($Cv(f_{m,a,cass})$)	52,5 (3,73)	52,2 (1,82)	60,8 (3,48)	65,3 (1,13)

FIGURE 12

Comparaison des efficacités d'une cassette fermée de 37 mm selon que l'axe de son orifice d'entrée est horizontal ou incliné à 45°. Points expérimentaux mesurés dans : (i) le tunnel vertical à air calme utilisé dans cette étude (carrés pleins pour la cassette horizontale et triangles pleins pour la cassette inclinée à 45°, débit d'échantillonnage 1 l.min⁻¹, échantillonneur statique isolé, aérosol de sphères de verre polydispersées) ; (ii) une chambre d'essais en air calme (section de 1 m² x hauteur de 3 m) utilisée par Kenny et al. (1999) (losanges vides, cassette inclinée à 45°, débit d'échantillonnage 2 l.min⁻¹, échantillonneur rotatif isolé situé à 0,36 m de l'axe vertical, rotation à 1 tour/min, aérosols d'oxyde d'aluminium quasi-monodispersés avec diamètres aérodynamiques moyens en masse égaux à 6, 26, 46 et 58 μm, 1,2 < GSD < 1,4).



des aérosols tests d'oxyde d'aluminium présentant quatre diamètres aérodynamiques allant de 6 à 58 μm (cf. Figure 12). Les tests ont été conduits dans une chambre d'essais présentant une hauteur verticale totale de 3 m et une aire de section de ~ 1 m². La cassette et la sonde de référence étaient

placées sur un rayon de 0,36 m depuis l'axe vertical de la chambre et tournaient à 1 tour/min, afin de réduire les effets d'éventuelles variations spatiales de la concentration en aérosol. Les résultats sont également représentés sur la Figure 12.

On observe un bon accord entre nos résultats et ceux obtenus par Kenny *et al.* (1999) pour les expériences avec une cassette inclinée, malgré les différences de méthode expérimentale.

D'autres tests ont précédemment été conduits dans l'air en mouvement (1 m.s⁻¹) par Buchan *et al.* (1986), qui ont étudié les performances d'une cassette fermée de 37 mm de diamètre dans un grand tunnel aéraulique rectangulaire, en utilisant trois tailles de particules et deux angles d'inclinaison de la cassette (cf. Figure 13). Les expériences conduites par Buchan *et al.* (1986) comprenaient une cassette montée sur un mannequin statique dirigé face au flux d'air (à 47° par rapport au flux d'air, cinq répétitions, carrés vides) et une cassette suspendue vers le bas sans mannequin (90° par rapport au flux d'air, cinq répétitions, triangles vides). Les coefficients de variation étaient trop faibles pour être portés sur les courbes. La figure montre également nos mesures d'efficacité d'échantillonnage pour une cassette orientée horizontalement et montée sur un corps factice cylindrique tournant à 2 tours/min (0° par rapport au flux d'air, trois répétitions, losanges vides). Un débit de cassette de 2 l.min⁻¹ a été utilisé dans toutes ces expériences (voir la légende de la Figure 13 pour plus de détails).

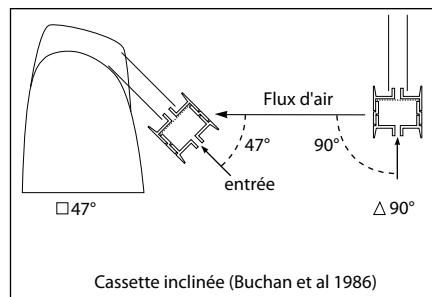
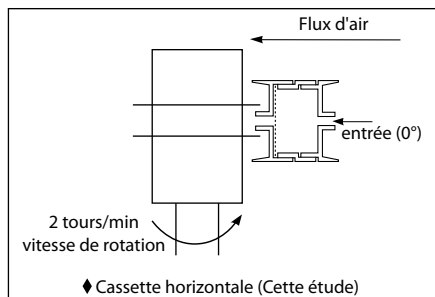
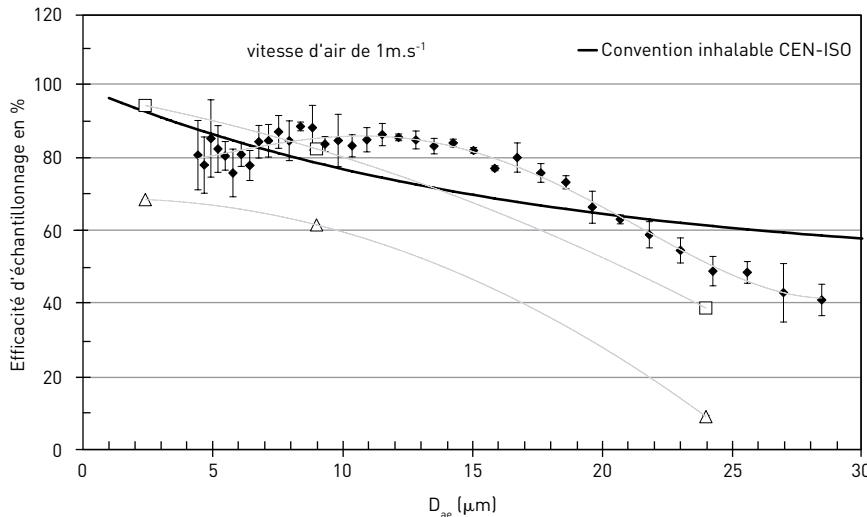
La possibilité de comparer les résultats de Buchan avec la convention CEN-ISO et les données acquises dans cette étude est malheureusement limitée, car l'efficacité de la cassette n'a pas été évaluée sur une vaste plage de tailles de particules d'aérosol et les tests sur mannequin ont été conduits sans rotation. Les valeurs obtenues par Buchan *et al.* (1986) pour la cassette inclinée à 47° et 90° (carrés et triangles vides) auraient donc été plus faibles si le test avait utilisé un mannequin tournant au lieu de le placer face au flux d'air.

Discussion sur les performances de la cassette fermée en fonction de l'inclinaison de l'orifice d'entrée

La Figure 12 montre clairement que l'efficacité d'aspiration de la cassette fermée de diamètre 37 mm dans l'air calme diminue si l'échantillonneur est orienté à 45° vers le bas. Il faut noter que, dans cette position, la structure externe de la cassette masque l'orifice de prélèvement, ce qui est particulièrement néfaste dans le cas d'un air calme où les particules

FIGURE 13

Comparaison des efficacités d'une cassette fermée de 37 mm ($2 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) selon que l'axe de son orifice d'entrée est horizontal (présente étude) ou incliné à 47° ou 90° (Buchan *et al.*, 1986). Points expérimentaux mesurés dans : (i) tunnel aéroulrique horizontal utilisé dans cette étude (losanges pleins, cassette orientée horizontalement, débit de $2 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, corps factice cylindrique en rotation à 2 tours/min, vitesse d'air $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aérousol de sphères de verre polydispersées) ; (ii) tunnel aéroulrique rectangulaire (50 cm de large x 70 cm de haut) utilisé par Buchan *et al.* (1986) (carrés vides, cassette accrochée à un mannequin statique et orientée à 47° , tournée vers le flux d'air de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aérousol quasi-monodispersé de MMAD égaux à 2,4 μm (fer), 9,0 μm (tungstène) et 24,0 μm (aluminium), $1,56 < \text{GSD} < 1,68$) ; (iii) tunnel aéroulrique rectangulaire (50 cm de large x 70 cm de haut) utilisé par Buchan *et al.* (1986) (triangles vides, cassette orientée à 90° par rapport au flux d'air, pas de mannequin, vitesse d'air $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, même aérousol test).



chutent verticalement sous l'effet de la gravité. Dans ces conditions, la perte d'efficacité d'aspiration induite par la position inclinée de l'échantillonneur pourrait être plus prononcée que dans des conditions d'air en mouvement. Cependant, la Figure 13 montre que, même dans des conditions de mouvement d'air, l'efficacité d'échantillonnage diminue quand la cassette est inclinée vers le bas par rapport à la position horizontale.

La direction de l'orifice d'entrée de la cassette fermée de diamètre 37 mm constitue l'un des principaux paramètres influençant l'efficacité d'échantillonnage de cet échantillonneur d'aérosols. Nos résultats soulignent l'intérêt de l'utilisation d'un support de cassette qui se fixe aux vêtements de l'ouvrier afin de maintenir l'axe de l'orifice horizontal.

CONCLUSION

La méthode consistant à évaluer l'efficacité d'échantillonnage au laboratoire est similaire à celle recommandée dans la norme EN 13205. Elle utilise de l'air en mouvement et l'échantillonneur est monté sur un corps factice en rotation modélisant ainsi l'opérateur. Les résultats de ces mesures servent à classer les échantillonneurs étudiés par rapport à l'objectif d'échantillonnage représenté par la convention internationale CEN-ISO-ACGIH. Les mesures d'efficacité conduites dans l'air calme constituent un complément et fournissent des informations sur le comportement des échantillonneurs dans ces conditions particulières.

Pour tous les échantillonneurs, les efficacités expérimentales pour les grosses particules ($D_{ae} > 50 \mu\text{m}$) ne cessent de diminuer et ne deviennent jamais constantes comme le prévoit par contre la convention CEN-ISO. Le profil partiellement horizontal de la courbe conventionnelle entre 50 et 100 μm implique que l'inertie des particules est constante sur cette intervalle de tailles. Ce paradoxe résulte du contexte historique de la convention : la courbe conventionnelle est une inhalabilité moyenne qui combine une multitude de conditions différentes (valeurs de vitesses d'air), certaines présentant une augmentation de l'efficacité en fonction de la taille des particules (cas des vitesses d'air élevées).

Pour tous les échantillonneurs testés, la forme de l'efficacité d'échantillonnage dans l'air calme est différente de celle dans l'air en mouvement. Ces résultats confortent l'idée de définir dans l'avenir une nouvelle convention qui conviendrait pour l'air calme ou pour les « ultra-faibles » vitesses d'air.

Les échantillonneurs IOM et CIP 10-I nouvelle version (v2) sont les deux méthodes qui répondent le mieux aux critères d'efficacité conventionnels pour l'échantillonnage de la fraction inhalable (cf. Figures 5 et 8). L'IOM présente également la meilleure efficacité de tous les échantillonneurs dans l'air calme.

L'efficacité du CIP 10-Iv2 dépasse celle de la première version (v1) (cf. Figures 7 et 8). Les efforts de développement d'une nouvelle tête d'échantillonnage CIP 10-I (Görner *et al.*, 2009) se manifestent par une meilleure conformité de l'efficacité de la version v2 par rapport à la courbe conventionnelle de la fraction inhalable. Le chapeau protecteur masque partiellement l'entrée annulaire pour protéger l'appareil vis-à-vis d'éventuelles grosses particules projetées ou tombant par gravité. Ceci explique également la diminution de l'efficacité d'échantillonnage pour les particules de plus de 40 μm dans un air strictement calme, caractérisé par des particules qui se déplacent seulement de haut en bas. Ces conditions d'air très calme sont rares dans le cas d'un échantillonnage individuel sur le terrain, en raison des mouvements de l'ouvrier qui porte l'échantillonneur.

L'efficacité d'échantillonnage de l'échantillonneur Bouton dans de l'air en mouvement n'est que légèrement inférieure à celle des échantillonneurs IOM

et CIP 10-I v2 (cf. *Figure 6*). Cet appareil sous-estime les valeurs conventionnelles pour les particules de diamètre $> 25 \mu\text{m}$. Il est probable que les plus grosses particules ne peuvent pas atteindre le filtre de collecte en raison de leur dépôt sur la grille protectrice qui recouvre la tête d'échantillonnage. Par rapport aux autres appareils, l'échantillonneur Bouton se classe mieux dans l'air calme que dans l'air en mouvement (cf. *Tableau III*). Cela est probablement dû à son orientation partiellement orientée vers le haut, qui lui permet de mieux aspirer les particules qui chutent verticalement.

L'efficacité d'échantillonnage de la cassette fermée de diamètre 37 mm était la plus faible de toutes les méthodes examinées (cf. *Figure 9*). Cette faible efficacité n'est que partiellement améliorée par l'utilisation du dispositif ACCUCAP™, qui permet de prendre en compte les dépôts sur les parois intérieures de la cassette (cf. *Figure 10*).

Le *Tableau IV* donne des informations sur la faible sensibilité de l'efficacité de la cassette fermée de 37 mm vis-à-vis du débit d'air. Les fractions échantillonnées sont très similaires pour des débits d'échantillonnage de 1 et 2 l.min⁻¹. Les efficacités d'aspiration de la cassette pour ces deux débits ne diffèrent pas de plus de 30 % sur la plage de tailles de particules jusqu'à 60 μm de diamètre.

Les résultats représentés sur les *Figures 12 et 13* montrent clairement la chute prononcée de l'efficacité de la cas-

sette fermée quand cet échantillonneur est incliné à 45° vers le bas. L'inclinaison de la cassette, donc de sa direction d'aspiration par rapport à la position horizontale, constitue un paramètre primordial pour l'efficacité d'échantillonnage de cet appareil. Ces résultats confirment l'intérêt d'un support de cassette dont la fixation sur les vêtements de l'ouvrier permet de maintenir horizontal l'axe de l'orifice d'entrée de la cassette.

Les tests de laboratoire sur des échantillonneurs de la fraction inhalable dans des conditions expérimentales parfaitement contrôlées nous permettent de comprendre le comportement de chaque échantillonneur en liaison avec sa conception et avec les paramètres extérieurs d'écoulement de l'air. De plus, cette méthode de mesure nous permet de comparer les efficacités des échantillonneurs dans des conditions identiques, même si ces conditions ne correspondent pas nécessairement à celles régnant sur le lieu de travail. L'analyse des résultats de ces tests de laboratoire révèle que deux échantillonneurs (IOM et CIP 10-I v2) respectent étroitement la convention d'échantillonnage de la fraction inhalable dans les conditions expérimentales appliquées. L'échantillonneur IOM fonctionnant à un débit de 2 l.min⁻¹ et ayant un vaste orifice d'entrée circulaire ouvert peut se montrer sensible aux particules grossières quand il fait face au flux d'air ou quand de grosses particules sont projetées par le processus industriel. L'échantillonneur CIP 10-I fonctionnant à un débit de 10 l.min⁻¹ et ayant

une fente d'échantillonnage omnidirectionnelle horizontale, partiellement abritée par un chapeau protecteur, peut s'avérer moins sensible à la direction du flux d'air et aux particules projetées. Le chapeau protecteur peut influencer l'échantillonnage des grosses particules dans un air parfaitement calme. Les performances des autres échantillonneurs testés peuvent être satisfaisantes quand on les utilise dans certaines conditions d'échantillonnage favorables.

Une étude de ces échantillonneurs sur le terrain, dans les conditions réelles d'un poste de travail, a été conduite dans divers procédés industriels du secteur du bois. Les résultats de ces essais industriels sont publiés par Kauffer et al. (2010), ainsi que des conclusions sur l'échantillonnage des poussières de bois et la mesure des expositions sur le lieu de travail.

Remerciements

Cette étude a été initiée par Jean-François Fabriès, malheureusement décédé en avril 2006, alors qu'il travaillait sur ce projet.

FIGURE A1

Schéma du tunnel aéraluque horizontal expérimental employé pour mesurer l'efficacité d'échantillonneurs de la fraction inhalable

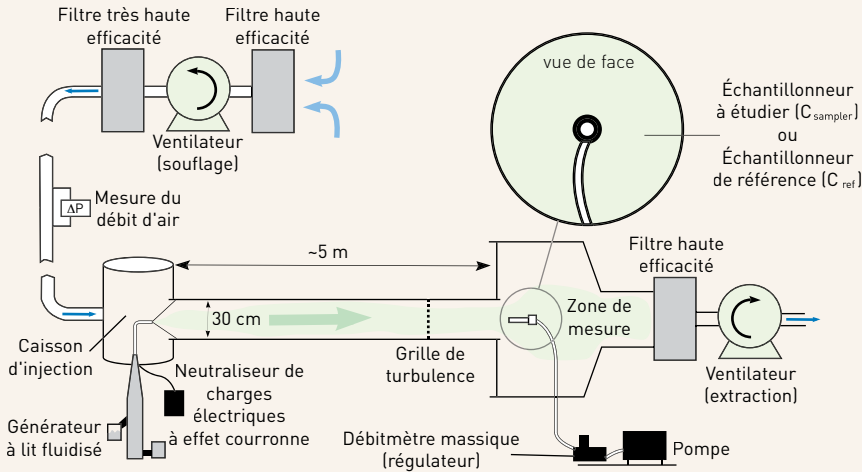
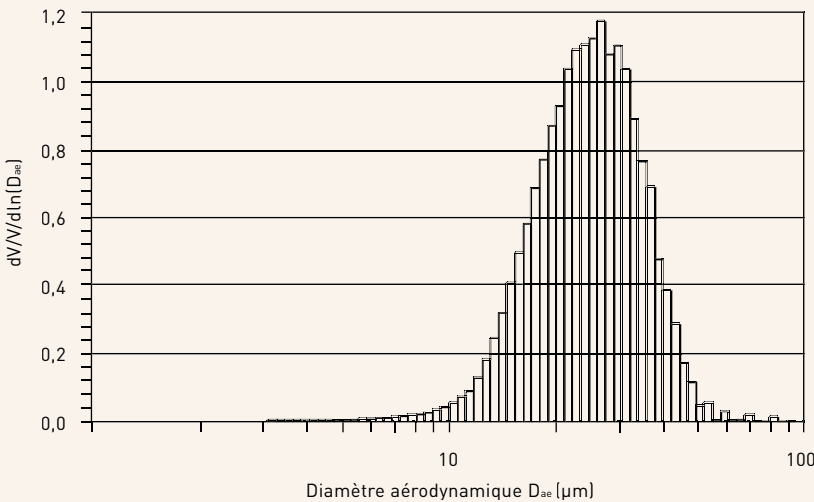


FIGURE A3

Distribution granulométrique en volume des sphères de verre utilisées dans le tunnel aéraluque horizontal ; MMAD = 24 μm ; GSD = 1,4 (analyse de la taille des particules par compteur Coulter® sur un échantillon de la sonde de référence).



INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES SUR LES ÉQUIPEMENTS DE LABORATOIRE

Tunnel aéraluque horizontal.

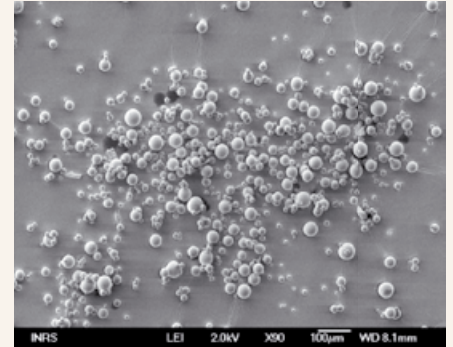
Le tunnel aéraluque expérimental à débit contrôlé peut produire des vitesses d'air de 1 à 4 m.s^{-1} . Le tunnel était composé d'un ventilateur centrifuge, d'un filtre à haute efficacité (HEPA), d'un générateur d'aérosol à lit fluidisé, d'un neutralisateur d'aérosol à effet couronne, d'une chambre d'homogénéisation d'aérosol et d'un conduit tubulaire de 5 m de long et 300 mm de diamètre (cf. Figure A1).

La section de mesure était conçue spécialement. L'aérosol était extrait de cette section de mesure en direction d'un filtre terminal et l'air était finalement rejeté du bâtiment. Une description détaillée du tunnel aéraluque et de tous les paramètres concernant l'écoulement et l'aérosol, ainsi que leur stabilité dans l'espace et le temps, est donnée par Witschger *et al.* (1997).

La vitesse d'air dans le tunnel aéraluque horizontal était maintenue constante et proche de 1 m.s^{-1} durant toutes les expériences décrites dans cet article. La vitesse de l'air au point d'échantillonnage était mesurée systématiquement à l'aide

FIGURE A2

Poudre de microsphères de verre utilisée comme aérosol test polydispersé



d'un anémomètre (DANTEC 54T21 - en calculant la moyenne de 60 mesures prises toutes les 2 s). Le tunnel garantissait des vitesses de l'air comprises entre 1,01 et 1,09 m.s^{-1} . La turbulence dans le plan d'échantillonnage présentait une intensité de 3 à 8%. L'échelle de turbulence typique était de $\sim 0,6$ cm (Witschger *et al.*, 1997).

Le corps factice cylindrique portant l'échantillonneur possède un diamètre de 110 mm et une épaisseur de 55 mm. L'aérosol est échantillonné au niveau de la sortie du tunnel dans une zone de mesure de 1 m^2 (cf. Figure A1).

L'aérosol test a été produit à partir de poudre de micro-sphères de verre polydispersées (BL 0 50 Verre Industrie - Figure A2) avec une densité des particules égale à 2,46 g.cm^{-3} , à l'aide d'un générateur d'aérosol à lit fluidisé (Guichard, 1976). Cette technique produisait des particules présentant un MMAD proche de 24 μm et un GSD proche de 1,4 (cf. Figure A3). La distribution des tailles des particules d'aérosol recueillies par la sonde de référence isocinétique était déterminée avec un compteur Coulter®. Les particules produites étaient neutralisées par décharge à effet couronne (Elcowa SC 67). La concentration massique moyenne des particules dans la section de mesure pouvait atteindre une valeur comprise entre 18 et 43 mg.m^{-3} .

Tunnel vertical à air calme

Le tunnel à air calme assurait une alimentation verticale descendante des particules d'aérosol jusqu'à la zone de mesure. Seuls le débit d'air venant du

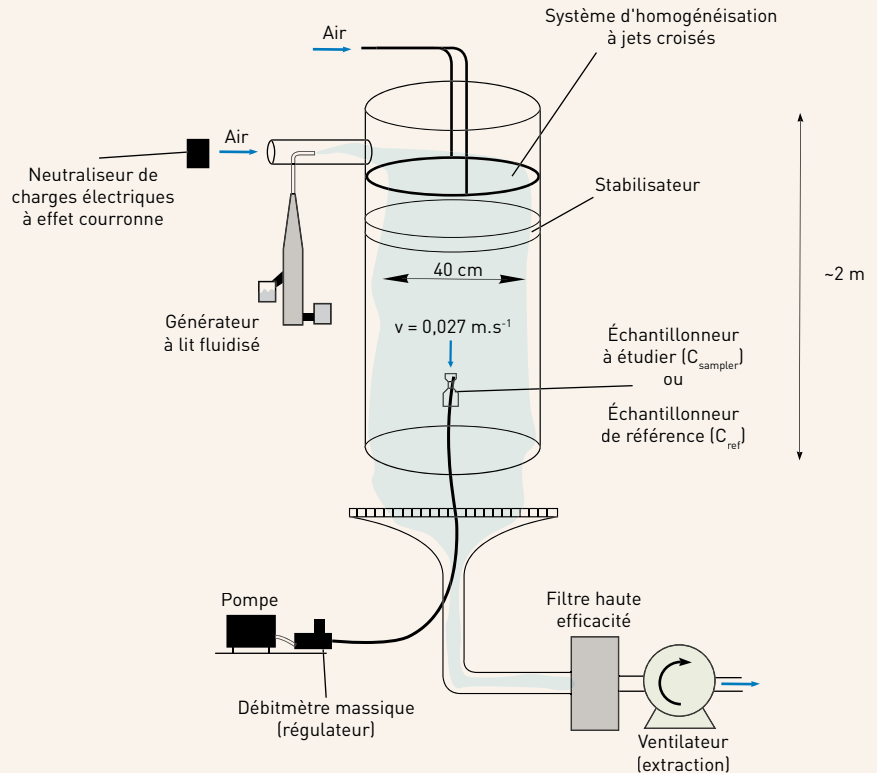
générateur de particules et un faible débit d'air de dilution pénètrent dans la section cylindrique de 400 mm, ce qui rend le courant d'air très proche d'un air calme (0,027 m.s⁻¹). Cet équipement a été décrit en détail par Roger (2000). La *Figure A4* présente la configuration expérimentale.

Une poudre de micro-sphères de verre polydispersées (BL 0-50 Verre Industrie) d'une densité de 2,46 g.cm⁻³ a été utilisée pour produire l'aérosol test dans la partie supérieure du tunnel. Les particules étaient mises en suspension à l'aide d'un lit fluidisé (Guichard, 1976), qui produisait un aérosol test présentant un MMAD de ~ 27,5 µm et un GSD de ~ 1,6 (cf. *Figure A5*). Les particules produites ont été neutralisées par décharge à effet couronne (Elcowa SC 67). La concentration massique moyenne des particules dans la zone de mesure pouvait atteindre une valeur comprise entre 34 et 45 mg.m⁻³.

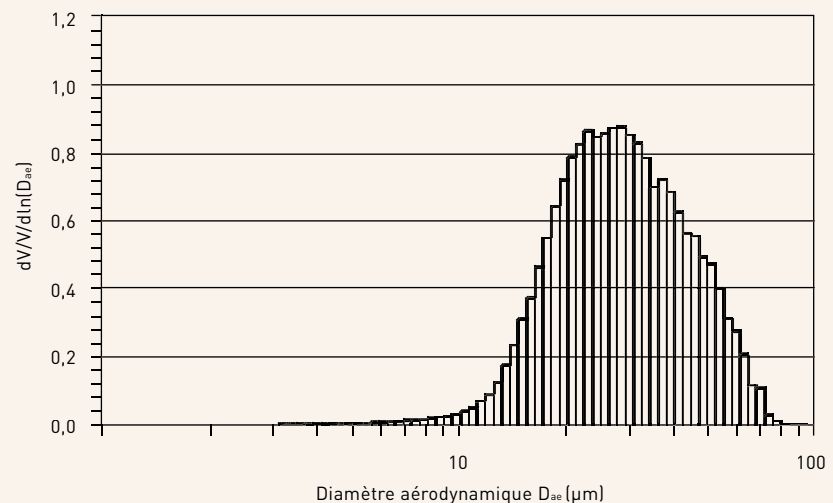
Les échantillonneurs testés et la sonde de référence ont été positionnés à ~ 0,1 m en amont de la sortie du conduit vertical. Aucun mannequin rotatif ni corps factice n'a été utilisé dans les essais en air calme.

FIGURE A4

Schéma du tunnel vertical à air calme expérimental employé pour mesurer l'efficacité d'échantillonnage d'échantillonneurs de la fraction inhalable.


FIGURE A5

Distribution granulométrique en volume des sphères de verre utilisées dans le tunnel aérodynamique vertical à air calme ; MMAD = 27,5 µm ; GSD = 1,6 (analyse de la taille des particules par compteur Coulter® sur un échantillon de la sonde de référence).



CALCUL DE L'EFFICACITÉ D'ÉCHANTILLONNAGE EXPÉRIMENTALE EN FONCTION DE LA TAILLE DES PARTICULES

Chaque série de valeurs expérimentales de l'efficacité d'échantillonnage représente la moyenne de trois essais expérimentaux. Un essai représente une mesure d'efficacité d'échantillonnage basée sur le rapport des concentrations mesurées « échantillonneur : référence » (les concentrations étaient analysées pour un grand nombre de taille de particules). Les concentrations de référence et de l'échantillonneur ont été mesurées séquentiellement dans un ordre qui a été choisi pour exclure toute dérive de la concentration pendant l'essai (première moitié du temps de prélèvement de la sonde de référence – temps de prélèvement complet pour l'échantillonneur – seconde moitié du temps de prélèvement de la sonde de référence).

Chaque point d'une courbe d'efficacité est calculé comme le rapport entre les deux concentrations numériques de particules selon l'équation suivante :

$$E_s(D_{ae}) = \frac{C_{n,sonde}(D_{ae})}{C_{n,ref}(D_{ae})} \quad (B1)$$

avec D_{ae} : diamètre aérodynamique des particules (μm) ; $C_{n,sonde}(D_{ae})$: concentration numérique des particules de diamètre compris entre D_{ae} et $(D_{ae} + dD_{ae})$, qui ont été échantillonnées par l'échantillonneur testé (nombre.l⁻³) ; $C_{n,ref}(D_{ae})$: concentration numérique des particules de diamètre compris entre D_{ae} et $(D_{ae} + dD_{ae})$, qui ont été aspirées dans la sonde de référence (nombre.l⁻³).

Les distributions de taille des aérosols et les concentrations numériques ont été obtenues avec un compteur de particules Coulter® Multisizer 3. Les particules à analyser étaient récupérées par lavage aux ultrasons, puis dispersées dans une solution électrolytique pour former une suspension. Le tube en verre du Coulter®, rempli de solution électrolytique et muni d'une ouverture calibrée de 100 μm , était alors plongé dans le becher d'analyse. La suspension de particules étaient aspirée à travers l'ouverture de 100 μm , induisant un courant électrique entre une électrode de platine présente dans le tube et une deuxième électrode plongée dans la suspension pour l'analyse. La

tension appliquée sur l'ouverture crée une « zone de détection » (Lines, 1991). Quand une particule traverse l'ouverture, elle déplace son propre volume d'électrolyte, ce qui augmente temporairement l'impédance de l'ouverture. Cette variation d'impédance produit une impulsion directement proportionnelle au volume de la particule (Allen, 1981). L'analyse de ces impulsions électriques permet de déduire une distribution de tailles en termes de diamètre équivalent en volume D_v (μm). De plus, un dispositif de dosage est utilisé pour soustraire un volume connu de suspension de particules à travers l'ouverture et le décompte du nombre d'impulsions peut alors fournir la concentration en particules dans chaque canal de taille étudié (64 canaux de taille ont été utilisés dans cette étude).

Du glycérol (15 % en masse) a été ajouté pour augmenter la viscosité de l'électrolyte et réduire la sédimentation des particules. La suspension était agitée en permanence pour éviter les pertes de particules par sédimentation. Le volume de particules analysé a été calculé à partir à la fois de la distribution des tailles de particules et du poids de l'échantillon original, en tenant compte des dilutions appliquées. Un biais de 10 % entre les volumes de particules a été toléré ; dans le cas contraire, les analyses étaient répétées (Görner *et al.*, 2000).

Le diamètre en volume D_v d'une particule peut être converti en diamètre aérodynamique D_{ae} en appliquant l'équation suivante :

$$\rho_0 \cdot D_{ae}^2 \cdot C_u(D_{ae}) = \rho_p \cdot \frac{D_v^2 \cdot C_u(D_v)}{\chi} \quad (B2)$$

avec ρ_0 : densité égale à 1 g.cm^{-3} ; $C_u(D)$: facteur de correction de Cunningham pour un diamètre D (#) ; χ : facteur dynamique de forme d'une particule (#) ; ρ_p : densité des particules (g.cm^{-3}).

Considérant que les particules de verre sont sphériques ($\chi=1$) et que les facteurs de correction de Cunningham ne diffèrent que de manière négligeable de l'unité pour des diamètres de particule supérieurs à 5 μm , nous pouvons appliquer l'équation simplifiée suivante :

$$D_{ae} = D_v \cdot \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_0}} \quad (B3)$$

Les concentrations numériques de particules ont été calculées à l'aide de l'équation :

$$C_{n,x}(D_{ae}) = \frac{N_x(D_{ae})}{V_x^{\text{air}}} \quad (B4)$$

x = échantillonneur, pour échantillonneur testé,

x = ref, pour sonde de référence

avec $N_x(D_{ae})$: nombre total de particules échantillonnées de diamètre D_{ae} (#) ; V_x^{air} : volume d'air échantillonné durant le test (l).

$$N_x(D_{ae}) = N_x^{\text{multisizer}}(D_{ae}) \cdot K_x \quad (B5)$$

avec $N_x^{\text{multisizer}}(D_{ae})$: nombre moyen de particules de diamètre D_{ae} , compté par le Multisizer 3, lors de l'analyse d'un volume total de particules $V_x^{\text{multisizer}}$; le nombre moyen de particules $N_x^{\text{multisizer}}(D_{ae})$ est calculé à partir de trois mesures différentes prises sur le même échantillon ; K_x : coefficient de dilution pour l'analyse de l'échantillon.

$$K_x = \frac{V_x^{\text{part}}}{V_x^{\text{multisizer}}} \quad (B6)$$

avec $V_x^{\text{multisizer}}$: volume total de particules comptées pendant l'établissement de la distribution en tailles sur le Multisizer 3 avec 64 canaux de taille (μm^3) ; V_x^{part} : volume de particules échantillonnées (μm^3).

$$V_x^{\text{part}} = \frac{M_x^{\text{part}}}{\rho_p} \times 10^9 \quad (B7)$$

avec M_x^{part} : masse des particules échantillonnées (détermination gravimétrique - mg) ; ρ_p : densité des particules (g.cm^{-3}).

BIBLIOGRAPHIE

- ACGIH (1994-1995) Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, OH.
- AFNOR (2008) NF X 43-257: 2008. Qualité de l'air. Air des lieux de travail. Prélèvement d'aérosol à l'aide d'une cassette (orifice 4 mm). Paris-La-Défense, AFNOR, mai 2008.
- AGARWAL JK, Liu BYH (1980) A criterion for accurate aerosol sampling in calm air. *Journal of American Industrial Hygiene Association*, 41: 191-197.
- AITKEN RJ, BALDWIN EJ, BEAUMONT GC, KENNY LC, MAYNARD AD. (1999) Aerosol inhalability in low air movement environments. *Journal of Aerosol Science*, 30: 616-626.
- AIZENBERG V, BIDINGER E, GRINSHPUN SA, WILLEKE K, HAMED A, TABAKOFF W (1998) Air flow and particle velocities near a personal aerosol sampler with curved, porous aerosol sampling surface. *Aerosol Science and Technology*, 28: 247-258.
- AIZENBERG V, GRINSHPUN SA, WILLEKE K, SMITH J, BARON PA (2000a) Performance characteristics of the button personal inhalable aerosol sampler. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 61: 398-404.
- AIZENBERG V, GRINSHPUN SA, WILLEKE K, SMITH J, BARON PA (2000b) Measurement of the sampling efficiency of personal inhalable aerosol samplers using a simplified protocol. *Journal of Aerosol Science*, 31 (2): 169-179.
- AIZENBERG V, CHOE K, GRINSHPUN SA, WILLEKE K, BARON PA (2001) Evaluation of personal aerosol samplers challenged with large particles. *Journal of Aerosol Science*, 32: 779-793.
- ALLEN T (1981) Particle size measurement. Third edition. Chapman and Hall, London.
- BALDWIN PEJ, MAYNARD AD (1998) A survey of wind speeds in indoor workplaces. *Annals of Occupational Hygiene*, 42: 303-313.
- BARON PA, KHANINA A, BENNETT JS, MARTINEZ AB, GRINSHPUN SA (2002) Investigation of filter by-pass leakage and a test for aerosol sampling cassettes. *Aerosol Science and Technology*, 36: 857-865.
- BROWN JS. (2005) Particle inhalability in low wind speeds. *Inhalation Toxicology*, 17: 831-837.
- BUCHAN RM, SODERHOLM SC, TILLERY MI (1986) Aerosol sampling efficiency of 37 mm filter cassettes. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47 (12): 825-831.
- CEN (1993) EN 481: 1993. Workplace atmospheres – Size fraction definitions for measurement of airborne particles. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles.
- CEN (2001) EN 13205: 2001. Workplace atmospheres – Assessment of performance of instruments for measurement of airborne particle concentrations. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles.
- CEN (2005) TR 15230:2005. Workplace atmospheres – Guidance for sampling of inhalable, thoracic and respirable aerosol fractions. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles.
- CHUNG KYK, OGDENTL, VAUGHAN NP (1987) Wind effects on personal dust samplers. *Journal of Aerosol Science*, 18 (2): 159-174.
- COURBON P, WROBEL R, FABRIÈS JF (1988) A new individual respirable dust sampler : The CIP 10. *Annals of Occupational Hygiene*, 32: 129-143.
- DAVIES CN (1968) The entry of aerosols into sampling tubes and heads. *British Journal Appl. Phys.*, 1 (2): 921-931.
- DAVIES CN (1977) Sampling aerosols with a thin-walled tube. *Atmospheric Pollution*, Elsevier, Amsterdam: 433-446.
- Décret législatif (1993) Ministère des affaires Sociales, du Travail et de la Solidarité. Décret n° 2003-1254 du 23 décembre 2003 relatif à la prévention du risque chimique et modifiant le code du travail. *Journal Officiel de la République Française* du 28 décembre 2003: 22329-22334.
- DEMANGE M, GENDRE JC, HERVÉ-BAZIN B, CARTON B, PELTIER A (1990) Aerosol evaluation difficulties due to the particle deposition on filter holder inner walls. *Annals of Occupational Hygiene*, 34 (4): 399-403.
- DEMANGE M, GÖRNER P, ELCABACHE JM, WROBEL R (2002) Field comparison of 37-mm closed-face cassettes and IOM samplers. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 17: 200-208.
- FABRIÈS JF, GÖRNER P, KAUFFER E, WROBEL R, VIGNERON JC (1998) Personal thoracic CIP 10-T sampler and its static version CATHIA-T. *Annals of Occupational Hygiene*, 42: 453-465.
- GÖRNER P, FABRIÈS JF. (1996) Industrial aerosol measurement according to the new sampling conventions. *Occupational Hygiene*, 3: 361-376.
- GÖRNER P, WITSCHGER O, ROGER F, WROBEL R, FABRIÈS JF (2008) Aerosol sampling by annular aspiration slots. *Journal of Environmental Monitoring*, 10: 1437-1447.
- GÖRNER P, WROBEL R, FABRIÈS JF (1990) Air filtration by rotating porous media. In *Proceedings of the 5th World Filtration congress*, Nice 5-8 June; Société Française de Filtration, Cachan: 165-167.
- GÖRNER P, WROBEL R, FABRIÈS JF (2000) Experimental method to determine the efficiency of aerosol samplers using the Coulter Counter. *Journal of Aerosol Science*, 3 (Suppl. 1): 268-269.
- GÖRNER P, WROBEL R, SIMON X (2009) High efficiency CIP 10-I personal inhalable aerosol sampler. In *Inhaled Particles X*, (23-25 September 2008, Manchester), *Journal of Physics: Conference Series* 151, 012061, IOP Publishing, doi: 10.1088/1742-6596/151/1/012061.
- GÖRNER P, WROBEL R, WITSCHGER O, ROGER F, FABRIÈS JF. (2003) Sélecteur de particules en suspension dans une atmosphère et dispositif d'échantillonnage pourvu d'un tel sélecteur. Patent n° 03 02322, Paris, 26 February 2003.
- GRINSHPUN SA, LIPATOV GN, SUTUGIN AG (1990) Sampling errors in cylindrical nozzles. *Aerosol Science and Technology*, 12: 716-740.
- GRINSHPUN SA, WILLEKE K, KALATOOR S (1993) A general equation for aerosol aspiration by thin-walled sampling probes in calm and moving air. *Atmospheric Environment*, 27A (9): 1459-1470. Corrigendum (1994) *Atmospheric Environment*, 28 (2) : 375.
- GUICHARD JC (1976) Aerosol generation using fluidised beds. In *Fine Particles*, B.Y.H. Liu ed., Academic Press, New York: 173-193.
- HARPER M, MULLER BS (2002) An evaluation of total and inhalable samplers for the collection of wood dust in three wood products industries. *Journal of Environmental Monitoring*, 4: 648-656.
- HARPER M, AKBAR MZ, ANDREW ME (2004) Comparison of wood-dust aerosol size-distributions collected by air samplers. *Journal of Environmental Monitoring*, 6: 18-22.

BIBLIOGRAPHIE

INRS (2006) Questions écrites – poussières de bois. Information Juridique n°3, Institut National de Recherche et de Sécurité, Paris.

ISO (1995) IS 7708: 1995. Air quality - Particle size fraction definitions for health-related sampling. International Standards Organisation, Geneva.

KAUFFER E, WROBEL R, GÖRNER P, ROTT C, GRZEBYK M, SIMON X AND WITSCHGER O (2009)

Comparaison sur site dans l'industrie du bois de quelques échantillonneurs d'aérosol, INRS, Hygiène et Sécurité du Travail, 219, juin 2010 (dans cette revue).

KAUPPINEN T, VINCENT R, LIUKKONEN T, GRZEBYK M, KAUPPINEN A, WELLING I, AREZES P, BLACK N, BOCHMANN F, CAMPELO F, COSTA M, ELSIGAN G, GOERENS R, KIKEMENIS A, KROMHOUT H, MIGUEL S, MIRABELLI D, MCENEANY R, PESCH B, PLATO N, SCHLÜNSSEN V, SCHULZE J, SONNTAG R, VEROUGSTRAETEV, DE VICENTE MA, WOLF J, ZIMMERMANN M, HUSGAFVELPURSIAINEN K, SAVOLAINEN K (2006) Occupational exposure to inhalable wood dust in the member states of the European Union. *Annals of Occupational Hygiene*, 50: 549-561.

KENNEDY NJ, TATYAN K, HINDS WC (2001) Comparison of a simplified and full-sized mannequin for the evaluation of inhalable sampler performance. *Aerosol Science and Technology*; 35: 564-568.

KENNY LC, LIDÉN G (1991) A technique for assessing size-selective dust samplers using the APS and polydisperse test aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 22: 91-100.

KENNY LC (1995) Pilot study of CEN protocols for the performance testing of workplace aerosol sampling instruments. EC contract MATr-CT92-0047 final report. Health and Safety Laboratory, Sheffield.

KENNY LC, AITKEN R, CHALMERS C, FABRIÈS JF, GONZALEZ-FERNANDEZ E, KROMHOUT H, LIDÉN G, MARK D, RIEDIGER G, PRODI V (1997) A collaborative European study of personal inhalable aerosol sampler performance. *Annals of Occupational Hygiene*, 41: 135-153.

KENNY LC, AITKEN RJ, BALDWIN PEJ, BEAUMONT GC, MAYNARD AD (1999) The sampling efficiency of personal inhalable aerosol samplers in low air movement environments. *Journal of Aerosol Science*, 30: 627-638.

KENNY LC, BEAUMONT G, GUDMUNDSSSEN A, KOCH W (2000) Small-scale aerosol sampler testing systems. *Journal of Aerosol Science*, 31: 406-407.

KOCH W, DUNKHORST W, LÖDDING H (1999) Design and performance of a new personal aerosol monitor. *Aerosol Science and Technology*, 31: 231-246.

KOCH W, DUNKHORST W, LÖDDING H, THOMASSEN Y, SKAUGSET NP, NIKANOV A, VINCENT J (2002) Evaluation of the RespiCon as a personal inhalable sampler in industrial environments. *Journal of Environmental Monitoring*, 4: 657-662.

LI S-N, LUNDGREN DA, ROVELL-RIXX D (2000) Evaluation of six inhalable aerosol samplers. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 61: 506-516.

LIDÉNG, JURINGEL, GUDMUNDSSON A (2000) Workplace validation of the laboratory evaluation test of samplers for inhalable and "total" dust. *Journal of Aerosol Science*, 31: 199-219.

LIDÉNG, HARPERM (2006) Analytical Performance Criteria. The need for an international sampling convention for inhalable dust in calm air. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3: D94-D101.

LINES RW, (1991) The electrical sensing zone method (The coulter principle). N.G. Stanley-Wood and RW Lines ed., (Royal Society of chemistry, Cambridge): 351-373.

MARK D, VINCENT JH (1986) A new personal aerosol sampler for airborne total dust in workplaces. *Annals of Occupational Hygiene*, 30: 89-102.

MAYNARD AD, KENNY LC (1995) Performance assessment of three personal cyclone models, using an aerodynamic particle sizer. *Journal of Aerosol Science*; 26: 671-684.

OGDEN TL (1983) Inhalable, inspirable and total dust. In: *Aerosols in the mining and industrial work environments*, editor: V.A. Marple, B.Y.H. Liu, Ann Arbor Science, 1: 185-204.

PAIK SY, VINCENT JH (2004) The orientation-averaged aspiration efficiency of IOM-like personal aerosol samplers mounted on bluff bodies. *Annals of Occupational Hygiene*, 48: 3-11.

PASKAR MA, HARKINS JM, MOOMEY JD, HECKER LH (1991) Internal wall losses of pharmaceutical dusts during closed-face, 37-mm polystyrene cassette sampling. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 52: 280-286.

RAMACHANDRAN G, SREENATH A, VINCENT JH (1998) Towards a new method for experimental determination of aerosol sampler aspiration efficiency in small wind tunnels. *Journal of Aerosol Science*, 29: 875-891.

RANDO R, POOVEY H, MOKADAM D, BRISOLARA J, GLINDMEYER H (2005) Field performance of the RespiCon for size-selective sampling of industrial wood processing dust. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2: 219-226.

ROGER F, LACHAPPELLE G, FABRIÈS JF, GÖRNER P, RENOUX A (1998) Behaviour of the IOM aerosol sampler as a function of external wind velocity and orientation. *Journal of Aerosol Science*, 29 (suppl. 1): S1133-S1134.

ROGER F (2000) Etude des performances d'un échantillonneur d'aérosols à fente annulaire dans l'air calme et dans l'air en mouvement – Expériences et simulations numériques. Thèse de doctorat de l'Université Paris XII.

SCHMEES DK, YI-HSUAN WU, VINCENT JH (2008) Experimental methods to determine inhalability and personal sampler performance for aerosols in ultra-low windspeed environments. *Journal of Environmental Monitoring*, 10: 1426-1436.

SLEETH DK, VINCENT JH (2009) Inhalability for aerosols at ultra-low windspeeds. In *Inhaled Particles X*, (23-25 September 2008, Manchester), *Journal of Physics: Conference Series*, 151, 012062, IOP Publishing, doi:10.1088/1742-6596/151/1/012061

SU W-C, VINCENT JH (2004) Towards a general semi-empirical model for the aspiration efficiencies of aerosol samplers in perfectly calm air. *Journal of Aerosol Science*, 35: 1119-1134.

TER KUILE WM (1978) Dust sampling criteria. A contribution to standardisation of "total dust" measurements. *Aerosole in Natur Wissenschaft, Med und Tech*, Wien, GAF: 365-373.

TER KUILE WM (1979) Dust sampling criteria. *Journal of Aerosol Science*, 10 (2): 241-242.

TER KUILE WM (1984) Vergleichmessungen mit verschiedenen Geräten zur Bestimmung der Gesamtstaubkonzentration am Arbeitsplatz – Teil II. *Staub – Reinhalt Luft*, 44: 211-216.

VINCENT JH, MARK, D (1990) Entry characteristics of practical workplace aerosol samplers in relation to the ISO recommendations. *Annals of Occupational Hygiene*, 34: 249 - 262.

BIBLIOGRAPHIE

VINCENT JH, MARK D, MILLER BG, ARMBRUSTER L, OGDEN TL (1990) Aerosol inhalability at higher windspeeds. *Journal of Aerosol Science*, 21: 577-586.

VINCENT JH (2005) Health-related aerosol measurement: a review of existing sampling criteria and proposals of new ones. *Journal of Environmental Monitoring*, 7: 1037-1053.

VINCENT JH (2006) Testing personal inhalable aerosol samplers: a suggested improved protocol based on new scientific knowledge. *Journal of Environmental Monitoring*, 8: 53-62.

WHO (1999) Hazard prevention and control in the work environment: Airborne dust. World Health Organisation Geneva 1999, WHE/SDE/OEH/99.14.

WITSCHGER O (1996) Etude théorique et expérimentale des facteurs physiques d'échantillonnage des polluants particulaires – Application aux capteurs à fente annulaire. Thèse de doctorat de l'Université Paris XII.

WITSCHGER O, WROBEL R, FABRIÈS JF, GÖRNER P, RENOUX A (1997) A new experimental wind tunnel facility for aerosol sampling investigations. *Journal of Aerosol Science*, 28: 833-851.

WITSCHGER O, WILLEKE K, GRINSHPUN SA, AIZENBERG V, SMITH J, BARON PA (1998) Simplified method for testing personal inhalable aerosol samplers. *Journal of Aerosol Science*, 29: 855-874.

WITSCHGER O, GRINSHPUN SA, FAUVEL S, BASSO G (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.