

COMPARAISON SUR SITE DANS L'INDUSTRIE DU BOIS DE QUELQUES ÉCHANTILLONNEURS D'AÉROSOL

Plusieurs échantillonneurs (IOM, CIP 10-I v1, ACCU-CAP™ et Bouton) ont été évalués avec le système CALTOOL dans différentes entreprises de l'industrie du bois. Les résultats obtenus montrent que comparés à la bouche de CALTOOL, qui peut être considérée comme représentative de l'exposition d'une personne placée au même endroit dans les mêmes conditions expérimentales, les concentrations mesurées par les échantillonneurs IOM, CIP 10-I v1 et ACCU-CAP™ ne sont pas significativement différentes (1,12, 0,94 et 0,80 respectivement à comparer à 1,00), l'échantillonneur Bouton (0,86) étant proche de l'échantillonneur ACCU-CAP™. Des comparaisons des concentrations de poussières mesurées en utilisant à la fois une cassette fermée (CF) et l'un des précédents échantillonneurs ont également été effectuées. Au total une série de 235 couples de prélèvements (échantillonneur + cassette fermée) effectués dans six entreprises a permis de comparer les concentrations mesurées par les échantillonneurs IOM, CIP 10-I v1, ACCU-CAP™ et Bouton aux concentrations mesurées par la cassette fermée. Tous les échantillonneurs étudiés prélèvent systématiquement plus que la cassette fermée (2,02 fois plus pour l'échantillonneur IOM, 1,84 fois plus pour l'échantillonneur CIP 10-I v1, 1,68 fois plus pour l'échantillonneur ACCU-CAP™ et 1,46 fois plus pour l'échantillonneur Bouton). C'est l'échantillonneur IOM qui a été le plus souvent comparé à la cassette fermée dans la littérature, les résultats publiés montrant en général des différences plus importantes par rapport à la cassette fermée que ceux obtenus au cours de ce travail. Plusieurs explications sont avancées pour expliquer cette différence dont l'une concerne l'orientation de la cassette fermée durant le prélèvement. Il a été montré que les concentrations mesurées par la cassette fermée dépendent de son orientation. Des positionnements différents de la cassette fermée durant le prélèvement d'une étude à l'autre sont ainsi susceptibles d'entraîner des différences lors des comparaisons de la cassette fermée et de l'échantillonneur IOM.

SITE COMPARISON OF SELECTED AEROSOL SAMPLERS IN THE WOOD INDUSTRY

Several samplers (IOM, CIP 10-I v1, ACCU-CAP™, and Button) were evaluated at various wood industry companies using the CALTOOL system. The results obtained show that compared to the CALTOOL mouth, which can be considered to be representative of the exposure of a person placed at the same location under the same experimental conditions, the concentrations measured by the IOM, CIP 10-I v1, and ACCU-CAP™ samplers are not significantly different (respectively, 1.12, 0.94, and 0.80 compared to 1.00), the Button sampler (0.86) being close to the ACCU-CAP™ sampler. Comparisons of dust concentrations measured using both a closed-face cassette (CFC) and one of the above samplers were also made. In all, 235 sampling pairs (sampler + CFC) taken at six companies provided us with a comparison of concentrations measured using IOM, CIP 10-I v1, ACCU-CAP™, and Button samplers with concentrations measured using a CFC. All the studied samplers collected systematically more dust than the CFC (2.0 times more for the IOM sampler, 1.84 times more for the CIP 10-I v1 sampler, 1.68 times more for the ACCU-CAP™ sampler, and 1.46 times more for the Button sampler). The literature most frequently compares the IOM sampler with the CFC: published results generally show larger differences compared with the CFC than those found during our research. There are several explanations for this difference, one of which involves CFC orientation during sampling. It has been shown that concentrations measured using a CFC are dependent on its orientation. Different CFC positions from one sampling session to another are therefore likely to cause differences during CFC-IOM sampler comparisons.

- ACCU-CAP™
- Échantillonneur Bouton
- CALTOOL
- CIP 10-I
- Cassette fermée
- Fraction inhalable
- Échantillonneur IOM
- Poussières de bois

► Edmond KAUFFER, Richard WROBEL, Peter GÖRNER, Christelle ROTT, Michel GRZEBYK, Xavier SIMON, Olivier WITSCHGER, INRS, département Métrologie des polluants

Cette étude de l'INRS a été initialement publiée dans *Annals of Occupational Hygiene*, volume 54, Numéro 2, pp. 188-203, 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™
- Button sampler
- CALTOOL
- CIP 10-I
- Closed-face cassette
- Inhalable fraction
- IOM sampler
- Wood dust

L'exposition aux poussières de bois est fréquente comme l'a montré une étude européenne récente qui estime que 3,6 millions de salariés sont occasionnellement exposés dans 25 états membres de l'union européenne (Kaupinen et al., 2006). Ces poussières peuvent être chez les sujets exposés à l'origine de cancers naso-sinusiens, d'atteintes des voies respiratoires et d'irritations cutanées ce qui a conduit l'International agency for research on cancer (IARC) à les classer comme cancérogènes chez l'homme sur la base d'études épidémiologiques (IARC, 1995). Au niveau européen les travaux exposant aux poussières de bois durs ont été classés cancérogènes (directive européenne 1999/38). Cette même directive a fixé une valeur limite d'exposition égale à $5\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour les poussières de bois durs en précisant que c'est la fraction inhalable qui doit être prélevée et que si les poussières de bois durs sont mélangées à d'autres poussières de bois, la valeur limite s'applique à toutes les poussières de bois présentes dans le mélange. En France cette valeur limite a été reprise dans le décret du 26 octobre 2007. La valeur limite applicable est égale à $1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, sans limitation quant à la nature du bois utilisé. La méthode de mesure pour le contrôle du respect des concentrations en poussières de bois dans l'atmosphère des lieux de travail a été précisée dans l'arrêté du 20 décembre 2004. Le prélèvement est effectué au moyen d'une cassette fermée (Association Française de Normalisation, 2008) et la concentration est calculée à partir de la connaissance de la masse de poussière déposée sur le filtre placé dans la cassette et du volume d'air prélevé. Les poussières déposées sur les parois internes de la cassette ne sont pas prises en compte. Cette méthode sera dénommée «cassette fermée» ou «CF» par la suite et correspond au terme «total dust sampling» souvent utilisé dans la littérature.

La cassette dans sa configuration fermée, c'est-à-dire avec un orifice d'entrée de 4 mm, a été très largement utilisée pour mesurer les expositions en milieu industriel depuis de nombreuses années. Cette cassette n'a en aucune manière été conçue pour prélever une fraction conventionnelle de l'aérosol (inhalable, thoracique ou alvéolaire), même si en pratique elle est essentiellement utilisée pour évaluer le risque dans des situations où la fraction pertinente de l'aérosol est la fraction

inhalable. L'étude de Kenny et al. (1997) sur la performance d'échantillonneurs de la fraction inhalable a d'ailleurs montré que la cassette fermée sous-estimait la fraction inhalable de manière significative lorsque la taille des particules présentes dans l'aérosol était supérieure à 20-25 microns environ en diamètre aérodynamique. Il a de plus été observé la présence de dépôt de poussières en quantité plus ou moins importante en fonction des situations sur les parois internes de la cassette (Demange et al., 1990, 2002 ; Harper et Demange, 2007). Ceci a conduit certaines méthodes d'analyse à prendre en compte ces dépôts lorsque cela est techniquement possible. C'est le cas pour l'analyse des métaux où la mise en solution peut être effectuée à l'intérieur même de la cassette (Institut national de recherche et sécurité, 2005). Le dépôt de poussières sur les parois internes de la cassette a également été signalé par Puskar et al. (1991) sur une série de prélèvements réalisés dans l'industrie pharmaceutique où en moyenne seulement 22 % des poussières étaient collectées sur le filtre, la présence de charges électrostatiques semblant être à l'origine de cet effet.

La publication dans le milieu des années 1990 de fractions conventionnelles normalisées de l'aérosol [Comité européen de normalisation (CEN), 1993 ; International organization for standardization (ISO), 1995] a permis le développement et favorisé l'utilisation de nombreux capteurs spécialement conçus pour prélever telle ou telle fraction conventionnelle de l'aérosol. On peut citer notamment pour la fraction inhalable le CIP 10-I développé à partir du CIP 10-R initialement conçu pour prélever la fraction alvéolaire (Courbon et al., 1988), l'échantillonneur IOM (Mark et Vincent, 1986) ou l'échantillonneur GSP (Ströhlein GmbH & Co., Kaarst, Germany). L'échantillonneur Bouton n'a pas été initialement conçu pour prélever la fraction inhalable (Kalatoor et al., 1995) mais il a été démontré qu'il pouvait être utilisé comme échantillonneur individuel de la fraction inhalable (Aizenberg et al., 2000). Parallèlement le développement d'un nouvel échantillonneur a été réalisé à partir de la cassette fermée pour permettre la prise en compte des dépôts sur les parois lors d'analyses gravimétriques. Cet échantillonneur comprend un accessoire qui se place à l'intérieur de la cassette et qui permet le recueil dans une capsule de l'ensemble des poussières pénétrant par

l'orifice d'entrée de la cassette fermée. Cité à l'origine dans une méthode de l'Occupational safety and health administration (méthode OSHA PV2121) et fabriqué en aluminium (Puskar et al., 1992), ce dispositif a ensuite été fabriqué en matière plastique et commercialisé sous le nom d'ACCU-CAPTM. On peut s'attendre à ce que cette modification corrige tout au moins en partie la sous-estimation observée des concentrations mesurées par la cassette fermée par rapport à la fraction conventionnelle inhalable comme ont pu le montrer des travaux préliminaires (Demange et al., 2003).

L'efficacité de prélèvement d'échantillonneurs individuels de la fraction inhalable est généralement mesurée en utilisant des dispositifs de laboratoire comme des tunnels à poussières dans lesquels des conditions idéales comme une circulation d'air uniforme et une concentration en aérosol constante sont réalisées (Kenny et al., 1997, 1999 ; Li et al., 2000 ; Aizenberg et al., 2001). Afin de s'assurer que les tests sont appropriés aux conditions prévalant sur les lieux de travail, un système dénommé CALTOOL a été développé. Le système CALTOOL est un mannequin construit dans le but d'évaluer sur site la performance des échantillonneurs (Mark et al., 2004) dont la première utilisation a été dans l'industrie du caoutchouc (de Vocht et al., 2006). Ce système permet de comparer la réponse des échantillonneurs étudiés à celle de la bouche du mannequin qui peut être considérée comme étant représentative de celle d'une personne placée au même endroit dans les mêmes conditions expérimentales. De plus il a été montré que CALTOOL donnait des résultats proches du critère d'inhalabilité en air calme proposé par Aitken et al. (1999).

Afin de préparer une évolution possible de la réglementation française en liaison avec la directive européenne qui demande pour les poussières de bois de prélever la fraction inhalable, les concentrations de poussières mesurées en utilisant ces différents échantillonneurs (CF, IOM, CIP 10-I, ACCU-CAPTM et Bouton) ont été évaluées dans différentes industries du bois en utilisant le système CALTOOL pour déterminer lesquels sont les plus proches du critère d'inhalabilité en air calme. Le nombre limité d'échantillonneurs testés est dû uniquement à la capacité limitée du laboratoire et n'implique aucunement

que d'autres n'auraient pas présenté un intérêt. Dans une seconde série d'expériences les résultats obtenus avec les échantillonneurs IOM, CIP 10-I, ACCU-CAP™ et Bouton ont été comparés à ceux obtenus avec la cassette fermée. Cela ne signifie pas que la cassette fermée soit considérée comme un échantillonneur de référence, mais cela nous donne la possibilité de savoir quelle sera l'influence d'un changement d'échantillonneur sur les concentrations mesurées.

L'objet de cet article est de présenter les résultats obtenus. Des résultats complémentaires obtenus également au cours de cette étude et pouvant être utiles pour la discussion seront mentionnés en annexes. Ils portent sur l'influence sur la concentration mesurée de l'orientation de la cassette fermée et de son débit (cf. *Annexe 1*) et sur la comparaison de deux versions du CIP 10-I (cf. *Annexe 2*).

METHODOLOGIE

ECHANTILLONNEURS UTILISÉS

Les caractéristiques et conditions d'utilisation de ces différents échantillonneurs étaient les suivantes :

■ IOM (SKC, SKC 22570) : prélèvement à un débit de 2 l.min⁻¹ sur membranes en polychlorure de vinyle (PVC) (Gelman, GLA 5000 66466) de diamètre 25 mm, diamètre de pores 5 µm, placées dans des cassettes métalliques (SKC 22575).

■ CIP 10-I VI, (Arelco, ARC 10 010 I SP) : prélèvement à un débit de 10 l.min⁻¹ sur mousses contenues dans des coupelles (ARC 10-007).

■ ACCU-CAP™, (Omega, OMEM083760CP) : prélèvement à un débit de 2 l.min⁻¹ sur membrane en esters de cellulose mélangés, diamètre de pores 0,8 µm, placés dans des cassettes fermées de diamètre 37 mm à 2 éléments.

■ Bouton, (SKC 225-360) : prélèvement à un débit de 4 l.min⁻¹ sur membrane en PVC (Gelman, GLA 5000 66466) de diamètre 25 mm, diamètre de pores 5 µm.

■ CF (Millipore, MOOO 037 Ao) : Cassette fermée à 3 éléments, prélèvement à un débit d'un l.min⁻¹ sur membrane en PVC (Gelman, GLA 5000

66469) de diamètre 37 mm, diamètre de pores 5 µm.

■ Un support filtre aérosol standard (Millipore XX5004700) a été utilisé pour prélever l'air à la position de la bouche du système CALTOOL : prélèvement à un débit de 20 l.min⁻¹ sur membrane en PVC (Gelman, GLA500066468) de diamètre 47 mm, diamètre de pores 5 µm.

L'échantillonneur ACCU-CAP™ et la cassette fermée étaient montés dans un dispositif spécial (Arelco, ARC 8507) afin que l'orifice d'entrée soit orienté vers l'avant (filtre dans un plan vertical).

PRÉLÈVEMENTS

Evaluation des échantillonneurs avec le système CALTOOL

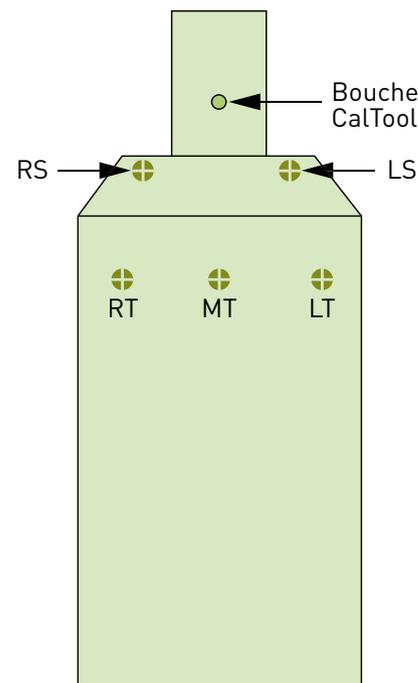
CALTOOL (Calibration Tool) est un mannequin idéalisé conçu pour évaluer la performance sur site des échantillonneurs (Mark et al., 2000 ; Fauvel et al., 2003).

Il se compose d'une tête cylindrique en acier inoxydable (diamètre 175 mm, hauteur 200 mm) montée sur la face supérieure d'un volume de section horizontale elliptique (diamètres 420 et 240 mm) également en acier inoxydable, qui symbolise un torse humain (cf. *Figure 1*). La tête est munie d'un orifice d'aspiration au niveau de la « bouche », relié à un porte-filtre de diamètre 47 mm situé en arrière par l'intermédiaire d'un tube cylindrique. L'orifice de diamètre 15 mm est placé à 10 cm du plan inférieur horizontal de la tête. Le débit d'aspiration utilisé pour échantillonner l'aérosol, assuré par une pompe volumétrique, est de 20 l.min⁻¹. Le torse permet le placement d'échantillonneurs individuels branchés sur la pompe volumétrique au moyen d'orifices critiques. Le dispositif CALTOOL est destiné à être utilisé en configuration fixe sur un lieu de travail.

Pour cette étude cinq positions ont été repérées pour placer les échantillonneurs : deux positions sur les épaules (gauche LS, droite RS) et trois positions sur le torse supérieur (gauche LT, centre MT, droite RT). Les échantillonneurs IOM, ACCU-CAP™, Bouton et cassette fermée ont été positionnés de manière aléatoire sur les positions LS, RS, LT et RT. L'échantillonneur CIP 10-I VI a

FIGURE 1

Représentation du système CALTOOL



toujours été positionné sur la position MT. En utilisant ce système des prélèvements ont été effectués dans cinq usines de l'industrie du bois.

Des débitmètres à lame de savon (Gilian, Gilibrator) étaient utilisés pour mesurer le débit des orifices critiques. Le débit de l'échantillonneur CIP 10-I était mesuré et ajusté au laboratoire sur un banc à perte de charge compensée, la vitesse de rotation de la coupelle étant vérifiée sur site à l'aide d'un tachymètre (Arelco, ARC 8527).

Comparaison des échantillonneurs avec la cassette fermée

Les prélèvements réalisés étaient des prélèvements individuels ou d'ambiance. Pour les prélèvements individuels, le salarié était équipé de deux échantillonneurs : la cassette fermée et l'un des quatre échantillonneurs utilisés pour la comparaison. Comme un certain nombre d'études (Golle and Paik, 1985 ; Vaughan et al., 1990) ont montré que le rapport entre les concentrations de poussières mesurées sur les deux épaules d'un salarié pouvaient être très différentes (de plus d'un facteur 2), nous avons pris soin de positionner la cassette fermée autant de fois sur la partie droite du salarié que sur la partie gauche

TABEAU 1

Ecart-type (SD) de la masse pour différents supports utilisés

Type de support	SD (σ) in μg
Cassette de l'échantillonneur IOM	39
Mousse + coupelle de l'échantillonneur CIP 10-I	46
Cassette de l'échantillonneur ACCU-CAP TM	13
Filtre de 25 mm en PVC de l'échantillonneur Bouton	3
Filtre de 37 mm en PVC de la cassette fermée	6
Filtre de 47 mm en PVC pour le support filtre aérosol standard	4

pour éviter tout biais dû à la position de l'échantillonneur. Pour les prélèvements d'ambiance, plusieurs échantillonneurs (au plus quatre) dont la cassette fermée étaient positionnés simultanément sur des supports à environ 1,60 m du sol.

Des pompes portables étaient utilisées pour les prélèvements (Gilian, modèle Gilair 3, pour les échantillonneurs IOM, ACCU-CAPTM et la cassette fermée, Gilian, modèle Gilair 5, pour l'échantillonneur Bouton)

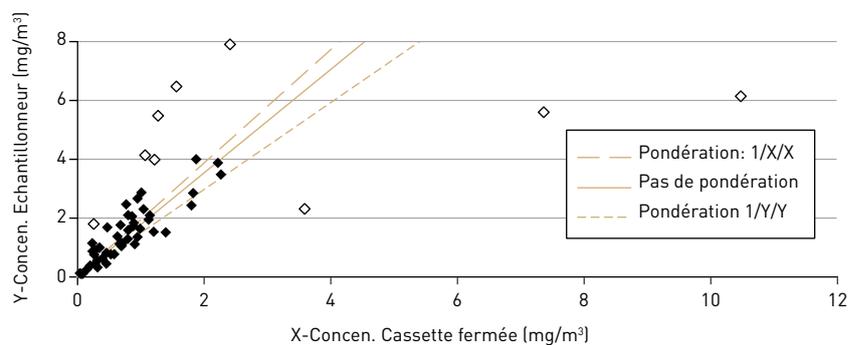
Comme pour les prélèvements réalisés avec le système CALTOOL, des débitmètres à lame de savon (Gilian, Gilibrator) étaient utilisés pour mesurer le débit des pompes et le débit de l'échantillonneur CIP 10-I était mesuré et ajusté au laboratoire sur un banc à perte de charge compensée, la vitesse de rotation de la coupelle étant vérifiée sur site à l'aide d'un tachymètre (Arelco, ARC 8527).

ANALYSE GRAVIMÉTRIQUE

Les supports de prélèvement étaient pesés sur des balances au μg , (Mettler MX5 pour les filtres, les cassettes IOM et les ACCU-CAPTM, Mettler AX26 pour les coupelles du CIP 10-I). Des supports témoins (généralement 6) étaient associés à chaque série de supports actifs (20 à 25 environ). Les supports étaient pesés avant et après le prélèvement. Avant chaque pesée, les supports étaient passés dans une étuve à 50°C pendant au moins 4 heures puis séjournèrent pendant au moins une nuit dans la salle

FIGURE 2

Relation entre les concentrations mesurées par un échantillonneur Y et la concentration mesurée par la cassette fermée X.



Les points clairs représentent les données exclues du calcul de la droite de régression par moindres carrés sans pondération sur la base d'un résidu de Student supérieur à 3. Les différentes droites de régression dépendent de la pondération choisie

de pesée. Les différences de poids entre la deuxième et la première pesée ont été corrigées des variations de poids des supports témoins. L'écart type sur la variation de masse a été déterminé pour les différents supports utilisés en suivant la norme NF ISO 15767 (ISO, 2003). Le *Tableau 1* présente les données obtenues.

En fonction du nombre de filtres témoins utilisés ces données permettent de calculer la variance associée à chaque détermination de la masse prélevée (différence entre la seconde et la première pesée).

TRAITEMENT DES DONNÉES

Dans cet article, le traitement des données est le plus souvent effectué pour établir une corrélation entre la concentration (Y) mesurée par un des échantillonneurs susceptibles de prélever la fraction inhalable et la concentration mesurée par la cassette fermée (X). Lorsque les points expérimentaux reportés sur un graphique sont quelque peu dispersés, ce qui est souvent le cas pour des prélèvements réalisés sur site, les hypothèses faites pour calculer la relation, supposée linéaire, entre Y et X prennent une importance toute particulière. La *figure 2* montre pour un échantillonneur particulier étudié au cours de cette étude l'ensemble des points expérimentaux Xi et Yi obtenus.

Si aucune hypothèse n'est faite, la droite de régression par moindres carrés va être tirée par les points extrêmes de

concentration élevée avec pour effet de passer à côté de la plupart des points expérimentaux (droite de pente égale à 1,00 non représentée sur la *Figure 2*). Pour remédier à cette situation on peut considérer que les points les plus dispersés sont des points aberrants. Si, par exemple, on élimine dans le calcul de la droite de régression par moindres carrés les points expérimentaux pour lesquels le résidu de Student est supérieur à 3, la droite de régression par moindres carrés, de pente 1,77, représente mieux les points expérimentaux mais au prix de l'élimination de 9 couples de données (en couleur claire sur la *Figure 2*). Eliminer ces données pose néanmoins problème car ce ne sont pas nécessairement des points aberrants. Elles peuvent seulement être le reflet de la variabilité des prélèvements réalisés sur site.

C'est cette idée qui a été prise en compte dans le traitement effectué par Martin et Zalk (1998) en reprenant la méthode proposée par Tsai et al. (1995). Pour tenir compte que la variabilité des points expérimentaux est d'autant plus grande que les concentrations sont élevées ces auteurs ont proposé d'introduire un facteur de pondération égal à $1/X^2$ (pondération par l'inverse du carré de la concentration mesurée par la cassette fermée) dans le calcul de la droite de régression. Ceci conduit à une droite de régression pondérée de pente égale à 1,93. Le nombre de données pour lesquels le résidu de Student est supérieur à 3 est considérablement réduit par rapport à la méthode précédente puisqu'il passe de 9 à 2, ce qui montre que ce modèle rend compte

TABLEAU II

Activité principale des entreprises

Entreprise	Activité principale
A	Fabrication de portes et fenêtres.
B	Fabrication de portes
C	Scierie
D	Fabrication de mobilier d'agencement
E	Fabrication de portes, escaliers...
F	Fabrication de mobilier d'agencement
G	Scierie

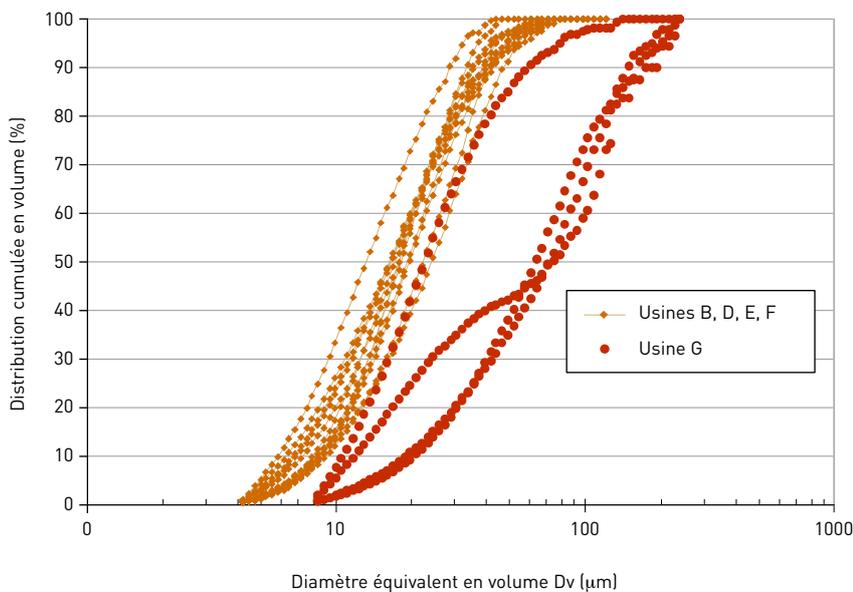
TABLEAU III

Etendue du diamètre médian équivalent en volume déterminé par la technique du compteur Coulter dans les entreprises B, D, E, F et G.

Entreprise	Diamètre médian équivalent en volume (étendue en μm)
B	17-23
D	19-21
E	17-28
F	13-17
G	22-67

FIGURE 3

Distribution cumulée en volume des particules en fonction du diamètre équivalent en volume pour les usines B, D, E, F et G.



d'un plus grand nombre de données. Cependant, cette façon de procéder n'est pas non plus satisfaisante car elle est trop dépendante du choix du facteur de pondération. On peut s'en convaincre aisément en choisissant de prendre l'autre axe comme facteur de pondération ($1/Y^2$). On obtient alors une droite de régression pondérée de pente 1,49 sans que l'on n'ait aucune justification pour choisir un axe plutôt qu'un autre pour pondérer les données. Les droites de régression obtenues sous ces trois hypothèses sont tracées sur la Figure 2.

Pour éviter ces inconvénients, un modèle plus complet a été mis en œuvre pour traiter les données. Il prend

en compte pour chaque mesure l'erreur analytique et l'erreur de prélèvement. L'erreur analytique propre à chaque résultat de mesure est caractérisée par une erreur relative modélisée par une distribution log-normale. Cette erreur relative a été déterminée à partir des erreurs sur la masse de poussière collectée et sur le volume d'air prélevé. L'erreur de prélèvement est caractérisée par un coefficient de variation identique pour tous les échantillonneurs, tous les prélèvements et toutes les entreprises. Ce coefficient de variation ainsi que les pentes des droites de régression sont déterminés par une analyse statistique utilisant les techniques bayésiennes (logiciel WINBUGS).

Pour chaque prélèvement p réalisé avec l'échantillonneur e (e variant de 0 pour la cassette fermée à 4).

$$Y_{pe} \sim \text{LN}(Y_{pe0}, eg_{pe})$$

$$Y_{pe0} \sim \text{LN}(\beta_e \times Y_p, eg_p)$$

Y_{pe} est le résultat de mesure du prélèvement p réalisé avec l'échantillonneur e ,

Y_{pe0} représente la valeur « vraie » du résultat de mesure du prélèvement p réalisé avec l'échantillonneur e ,

eg_{pe} est l'écart-type de l'erreur d'analyse,

Y_p représente la valeur « vraie » de la concentration du prélèvement (en individuel ou à point fixe),

β_e est le coefficient de régression entre la concentration mesurée par l'échantillonneur e et la concentration mesurée par la cassette fermée (avec pour convention $\beta_0 = 1$ pour la cassette fermée),

eg_p est l'écart-type géométrique caractérisant l'erreur de prélèvement.

RESULTATS

Les prélèvements ont été réalisés dans sept entreprises. Le Tableau II décrit leur activité.

EVALUATION DES ÉCHANTILLONNEURS À L'AIDE DU SYSTÈME CALTOOL

Les prélèvements ont été effectués dans cinq usines de l'industrie du bois (usines B, D, E, F et G du Tableau II). La concentration moyenne mesurée à la position de la bouche était égale à $1,4 \text{ mg.m}^{-3}$ (étendue comprise entre $0,15$ et $6,1 \text{ mg.m}^{-3}$).

Pour chaque série de prélèvements (en général 3 par usine sauf 4 pour l'usine G), la distribution en taille des particules a été déterminée par la technique du compteur Coulter sur les filtres prélevés au niveau de la bouche de CALTOOL. Les résultats correspondant sont donnés dans le Tableau III et la Figure 3.

Comme les diamètres médians équivalents en volume mesurés sur les prélèvements effectués dans l'usine G

(22,2 – 66,8 μm) sont très différents de ceux obtenus dans les autres usines (13-28 μm), les résultats obtenus dans l'usine G sont décrits séparément. Le **Tableau IV** donne le rapport moyen R de la concentration mesurée par chaque échantillonneur à la concentration mesurée à la bouche de CALTOOL ainsi que son écart-type. Pour chaque mesure, ce tableau donne également les limites supérieures et inférieures de l'intervalle de confiance ainsi que le coefficient de variation du rapport R.

La **Figure 4** présente les mêmes résultats dans la représentation classique de boîte à moustaches.

Le **Tableau V** présente les résultats obtenus dans la cinquième usine (usine G) sous la même forme que précédemment.

La **Figure 5** présente les mêmes résultats dans la représentation classique de boîte à moustaches.

COMPARAISON DES ÉCHANTILLONNEURS AVEC LA CASSETTE FERMÉE

Au total, 235 couples de prélèvements (échantillonneur + cassette fermée) ont été obtenus dans six entreprises (A à F du **Tableau I**).

Le **Tableau VI** donne le nombre de couples de prélèvements effectués par type d'échantillonneurs ainsi que leur répartition entre prélèvements d'ambiance et prélèvements individuels.

Le **Tableau VII** donne pour les différents échantillonneurs étudiés la valeur des pentes des droites de régression déterminée par le modèle statistique décrit dans le paragraphe traitement des données. Pour chaque échantillonneur, ces données sont présentées de manière globale, mais aussi en distinguant les prélèvements d'ambiance et les prélèvements individuels. L'erreur de prélèvement déterminée par le modèle statistique a été évaluée à 27 %.

Les **Figures 6 à 9** représentent la relation entre la concentration mesurée par un des échantillonneurs et la cassette fermée pour les échantillonneurs IOM, CIP 10-I v1, ACCU-CAPTM et Bouton respectivement. L'échelle des axes est telle que le rapport entre l'échelle verticale et horizontale est constant (1,5) ce qui permet une comparaison directe des pentes.

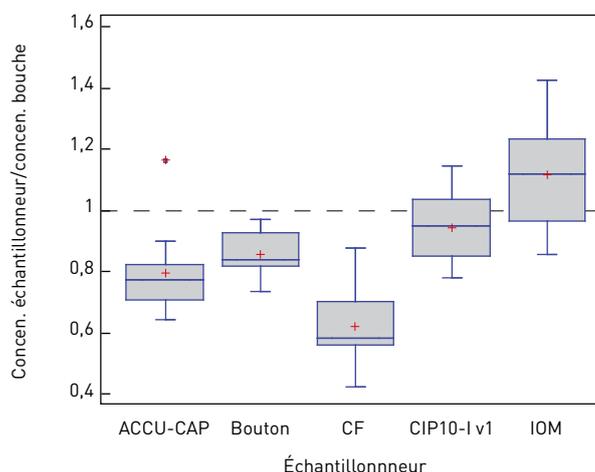
TABLEAU IV

Rapport de la concentration mesurée par chaque échantillonneur sur la concentration mesurée au niveau de la bouche de CALTOOL (usines B,D,E et F)

Echantillonneur	Nombre de mesures	Rapport R : concentration échantillonneur/concentration bouche de CALTOOL				
		Moyenne	Ecart-type	Limite inférieure	Limite supérieure	Coefficient de variation (%)
IOM	12	1,12	0,17	0,86	1,43	15,3
CIP 10-I v1	12	0,94	0,11	0,78	1,15	12,2
ACCU-CAP TM	12	0,80	0,14	0,64	1,17	17,1
Bouton	12	0,86	0,08	0,74	0,97	8,9
Cassette fermée	12	0,62	0,13	0,42	0,88	21,5

FIGURE 4

Représentation en boîte à moustaches du rapport de la concentration mesurée par un échantillonneur sur la concentration mesurée au niveau de la bouche de CALTOOL (usines B, D, E et F). Le symbole + représente la moyenne.



DISCUSSION

EVALUATION DES ÉCHANTILLONNEURS AVEC LE SYSTÈME CALTOOL

Les données présentées dans le **Tableau IV** montrent que les concentrations mesurées avec les échantillonneurs IOM, CIP 10-I v1 et ACCU-CAPTM ne sont pas significativement différentes de la concentration de référence (respectivement 1,12 ; 0,94 et 0,80 comparés à 1,00) et que ce n'est pas le cas pour l'échantillonneur Bouton et la cassette fermée. En fait, les échantillonneurs ACCU-CAPTM (0,80) et Bouton (0,86) sont proches l'un de l'autre, l'échantillonneur Bouton étant probablement pénalisé par son faible coefficient de variation qui permet une meilleure différenciation par rapport à la concentration de référence. Les coefficients de

TABLEAU VI

Nombre de prélèvements d'ambiance ou individuels pour les différents échantillonneurs étudiés

Echantillonneur	Nombre de couples de prélèvements	
	Ambiance	Individuel
IOM	37	28
CIP 10-I v1	36	25
ACCU-CAP TM	36	26
Bouton	23	24

variation varient de 9 à 21 % pour les différents échantillonneurs. C'est la cassette fermée qui a le coefficient de variation le plus élevé, ce qui peut être dû à la variabilité additionnelle introduite par la proportion de dépôt entre le filtre et les parois internes de la cassette.

TABLEAU V

Rapport de la concentration mesurée par chaque échantillonneur sur la concentration mesurée au niveau de la bouche de CALTOOL (usine G)

Échantillonneur	Nombre de mesures	Rapport R : concentration échantillonneur/concentration bouche de CALTOOL				
		Moyenne	Ecart-type	Limite inférieure	Limite supérieure	Coefficient de variation (%)
IOM	4	4,53	4,71	1,22	11,5	104
CIP 10-I v1	4	0,704	0,18	0,50	0,87	25,3
ACCU-CAP™	3	0,62	0,08	0,57	0,71	12,7
Bouton	4	0,55	0,22	0,35	0,81	38,8
Cassette fermée	4	0,31	0,14	0,16	0,49	43,6

immédiatement l'augmentation quasi générale des coefficients de variation mesurés (13 à 104 %). L'échantillonneur IOM présente le coefficient de dispersion le plus élevé. C'est probablement le résultat de sa grande ouverture qui favorise la prise en compte de projections directes, même s'il est toujours délicat de tirer des conclusions à partir de données en nombre limité.

COMPARAISON DES ÉCHANTILLONNEURS AVEC LA CASSETTE FERMÉE

Pour les échantillonneurs IOM, CIP 10-I v1, ACCU-CAP™ et Bouton, on dispose d'environ cinquante données comparées des concentrations mesurées par un échantillonneur et la cassette fermée. Ces résultats correspondent aussi bien à des prélèvements d'ambiance qu'à des prélèvements individuels. Les résultats présentés dans le *Tableau VII* montrent que, globalement (prélèvements d'ambiances et individuels confondus), tous les échantillonneurs étudiés prélèvent statistiquement plus que la cassette fermée (2,02 fois plus pour l'échantillonneur IOM, 1,84 fois plus pour l'échantillonneur CIP 10-I v1, 1,68 fois plus pour l'échantillonneur ACCU-CAP™ et 1,46 fois plus pour l'échantillonneur Bouton). Pour chaque échantillonneur, les rapports (concentration mesurée par l'échantillonneur / concentration mesurée par la cassette fermée) ne sont pas statistiquement différents entre prélèvements d'ambiance et prélèvements individuels.

De nombreux articles visant à comparer la concentration mesurée par un échantillonneur susceptible de prélever la fraction inhalable et la concentration mesurée par la cassette fermée ont été publiés dans la littérature. En se limitant à ceux pour lesquels la comparaison a été effectuée dans l'industrie du bois on peut citer : Lamont Moore et al. (1990), Perrault et al. (1996, 1999), Martin et Zalk (1998), Tatum et al. (2001), Harper et Muller (2002).

L'article d'Harper et Muller (2002) compare les concentrations pondérales obtenues lors de prélèvements individuels réalisés en parallèle en associant deux à deux les échantillonneurs IOM, Bouton et la cassette fermée. Les résultats présentés montrent que l'échantillonneur IOM et la cassette fermée mesurent des concentrations statistiquement

FIGURE 5

Représentation en boîte à moustaches du rapport de la concentration mesurée par un échantillonneur sur la concentration mesurée au niveau de la bouche de CALTOOL (usine G). Le symbole + représente la moyenne.

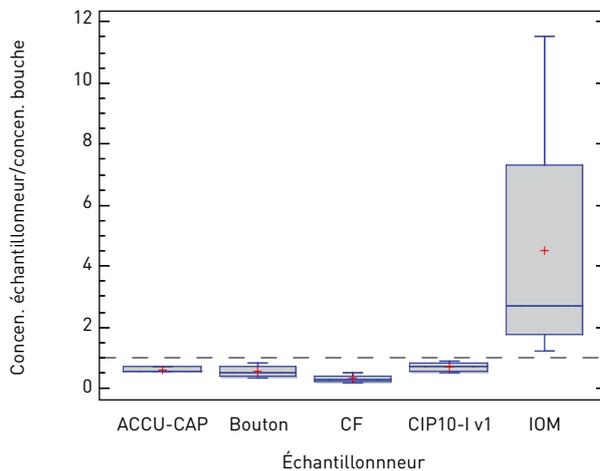


TABLEAU VII

Pentes des droites de régression pour les différents échantillonneurs et les différents types de prélèvement : ensemble des données, prélèvements d'ambiance ou prélèvements individuels. Les données sont accompagnées de leur intervalle de confiance (IC) à 95 %

Échantillonneur	Pente de la droite de régression échantillonneur/ cassette fermée		
	Tous les points (IC)	Ambiance (IC)	Individuel (IC)
IOM	2,02 [1,83-2,22]	2,01 [1,78-2,26]	2,09 [1,75-2,47]
CIP 10-I v1	1,84 [1,67-2,01]	1,76 [1,57-1,97]	2,01 [1,73-2,34]
ACCU-CAP™	1,68 [1,53-1,84]	1,74 [1,54-1,95]	1,57 [1,34-1,83]
Bouton	1,46 [1,32-1,62]	1,54 [1,34-1,77]	1,36 [1,16-1,59]

Les données présentées dans le *Tableau V* ont été obtenues dans des conditions particulières. Le système CALTOOL était positionné très près d'une source d'émission de poussières, en contrebas d'un poste de rognage. Son orientation par rapport à la source de poussières a été quelque peu modifiée

au cours des quatre expériences réalisées, ce qui a conduit à mesurer des diamètres de particules médians très différents (22 ; 52,8 ; 61,2 et 66,8 µm). Les résultats obtenus dans ces conditions où le risque de projections directes était très important sont différents de ceux obtenus précédemment. On constate

quement différentes. La même observation est faite pour les échantillonneurs IOM et Bouton. Par contre, l'échantillonneur Bouton et la cassette fermée ne mesurent pas des concentrations de poussières de bois statistiquement différentes. Les rapports IOM/CF moyens et médians sont respectivement égaux à 5,5 et 3,3 [données calculées à partir du tableau 1 de l'article de Harper et Muller (2002)]. De même les rapports Bouton/CF moyens et médians sont respectivement égaux à 0,93 et 0,87 respectivement [données également calculées à partir du tableau 1 de l'article de Harper et Muller (2002)].

Dans l'étude de Tatum et al. (2001), des prélèvements comparés ont été réalisés en ambiance entre les échantillonneurs IOM, CIS (conical inhalable sampler, modèle en plastique du GSP), 7-hole (échantillonneur multi-orifice) et la cassette fermée. Le plan d'expérience était conçu pour fournir des informations sur les performances relatives des différents échantillonneurs mais aussi sur leur précision. Les rapports de concentration varient de 0,6 à 3,7 (moyenne 1,85) pour IOM/CF, de 0,7 à 2,8 (moyenne 1,34) pour 7-hole/CF et de 1,0 à 2,7 (moyenne 1,46) pour CIS/CF. Pour chaque échantillonneur le coefficient de variation des mesures varie de 2,8 à 20 % pour la cassette fermée, de 1,9 à 29,7 % pour l'échantillonneur CIS, de 14,4 à 52,8 % pour l'échantillonneur IOM et de 11,6 à 40,6 % pour l'échantillonneur 7-hole. Ceci conduit les auteurs à suggérer que les échantillonneurs CIS et cassette fermée pourraient être plus reproductibles que les échantillonneurs IOM et 7-Hole.

Martin et Zalk (1998) sur une série de 17 prélèvements individuels montrent que le rapport IOM/CF varie de 1,8 à 4,1 (moyenne 2,8) lorsque la concentration mesurée par la cassette fermée est supérieure à 0,5 mg.m⁻³ et de 2,1 à 71 (moyenne 22,9) lorsque la concentration mesurée par la cassette fermée est inférieure à 0,5 mg.m⁻³. Les valeurs les plus élevées du rapport IOM/CF sont expliquées par la plus grande ouverture de l'échantillonneur IOM qui rend possible la collection par projection de particules de grand diamètre. L'observation en microscopie optique à contraste de phase confirme la présence de particules de diamètre supérieur à 100 µm pour les prélèvements réalisés avec l'échantillonneur IOM.

FIGURE 6

Relation entre les concentrations mesurées par l'échantillonneur IOM et la cassette fermée

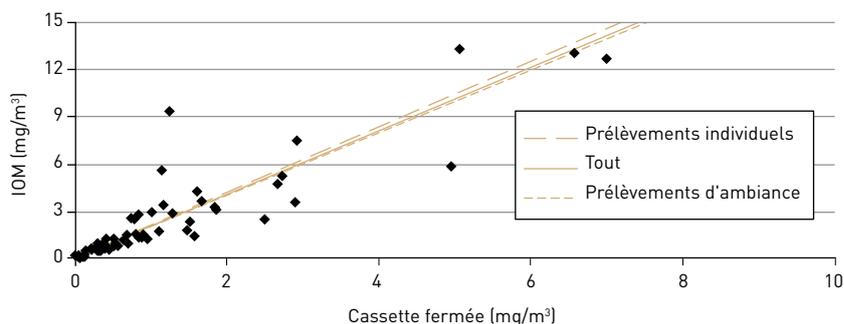
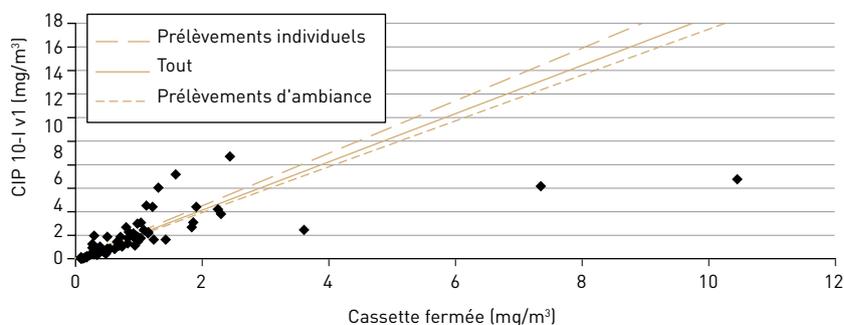


FIGURE 7

Relation entre les concentrations mesurées par l'échantillonneur CIP 10-1 v1 et la cassette fermée



D'autres mesures comparées de la concentration en poussières de bois obtenues avec l'échantillonneur IOM et la cassette fermée ont été publiées par Perrault et al. (1999). Ces mesures correspondent à des prélèvements réalisés dans une usine de fabrication de meubles, trois scieries et trois papeteries. Au total, 205 prélèvements ont été réalisés. Les valeurs moyennes du rapport IOM/CF obtenues en fonction du lieu de prélèvement et du type de prélèvement (individuel ou ambiance) varient de 2,25 à 4,29 (moyenne 2,75). Perrault associé à d'autres auteurs (Perrault et al., 1996) a aussi comparé dans une scierie et trois papeteries les concentrations mesurées par la cassette fermée à celles mesurées par une cassette fermée avec capsule (un dispositif probablement proche de l'ACCU-CAPTM) et par l'échantillonneur IOM. Tous les prélèvements sont des prélèvements d'ambiance. Les valeurs moyennes varient de 1,86 à 3,27 (moyenne 2,45) pour le rapport cassette fermée avec enceinte/CF et de 2,63 à 4,74 (moyenne 3,68) pour le rapport IOM/CF en fonction du lieu de prélèvement.

Une autre série de prélèvements comparés a été obtenue par Lamont Moore et al. (1990). La comparaison porte sur 17 prélèvements personnels réalisés avec la cassette fermée et un échantillonneur commercialisé par MSA (cassette contenant une capsule en aluminium). La concentration moyenne mesurée par le dispositif MSA est égale à 3,48 mg.m⁻³, celle mesurée par la cassette fermée est égale à 1,60 mg.m⁻³, ce qui donne un rapport égal à 2,2 pour le rapport cassette fermée avec capsule/cassette fermée.

Le **Tableau VIII** reprend les moyennes des résultats obtenus par ces différents auteurs pour les rapports IOM/CF, cassette avec capsule/CF et Bouton /CF. Le dispositif dénommé cassette avec capsule recouvre aussi bien l'ACCU-CAPTM que d'autres dispositifs comme la cassette MSA.

A la lecture du **Tableau VIII**, on peut constater que les valeurs obtenues par différents auteurs pour le rapport des concentrations mesurées par l'échantillonneur IOM et la cassette fermée

FIGURE 8

Relation entre les concentrations mesurées par l'échantillonneur ACCU-CAP™ et la cassette fermée

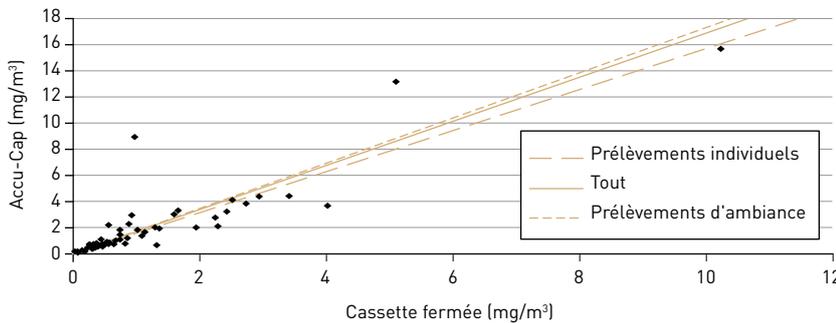


FIGURE 9

Relation entre les concentrations mesurées par l'échantillonneur Bouton et la cassette fermée

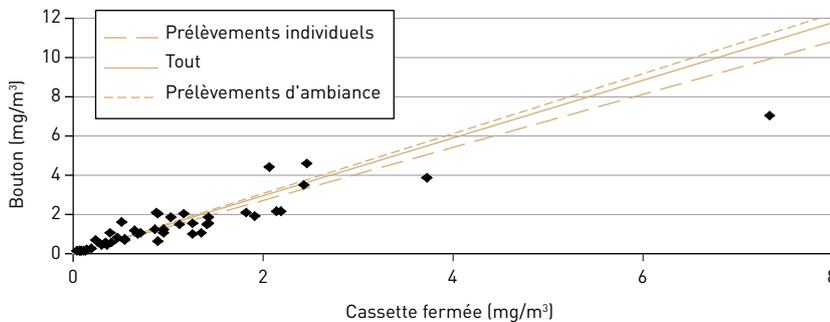


TABLEAU VIII

Concentrations mesurées par l'échantillonneur IOM, la cassette fermée avec capsule, l'échantillonneur Bouton comparés aux concentrations mesurées par la cassette fermée. Compilation des résultats publiés dans la littérature.

Auteurs	Echantillonneur IOM/CF		Cassette fermée avec capsule/CF		Echantillonneur Bouton/CF	
	Nombre de mesures	Rapport moyen	Nombre de mesures	Rapport moyen	Nombre de mesures	Rapport moyen
Kauffer et al. (présent travail)	65	2,02	62	1,68	47	1,46
Harper et Muller (2002)	16	5,5			23	0,93
Tatum et al. (2001)	70	1,85				
Martin et Zalk (1998)	17	22,9 ^a 2,8 ^b				
Perrault et al. (1999)	54	3,68	54	2,45		
Perrault et al. (1996)	250	2,75				
Lamont Moore et al. (1990)			17	2,2		

a : lorsque la concentration mesurée par la cassette fermée est inférieure à 0,5 mg.m⁻³.

b : lorsque la concentration mesurée par la cassette fermée est supérieure à 0,5 mg.m⁻³.

présentent une grande variabilité. Le coefficient 2,02 obtenu dans cette étude se situe dans la partie basse de la plage de variation. Plusieurs explications peuvent être données pour expliquer l'importante variabilité des résultats.

La première est liée aux circonstances des prélèvements. Les mesures ont été réalisées dans des pays différents, des industries différentes, les essences de bois travaillées et les procédés de fabrication pouvant également être différents.

Une deuxième explication tient à la large ouverture de l'échantillonneur IOM (15 mm) comparée à l'ouverture de la cassette fermée (4 mm). Cette large ouverture peut favoriser, dans certains cas (poussières de granulométrie grossière, proximité des sources), la prise en compte dans le prélèvement, par projection directe, de particules de grandes dimensions (supérieures à 100 µm en diamètre). Harper et al. (2004), dans une étude sur la comparaison de la distribution en taille des poussières de bois prélevées par plusieurs échantillonneurs, ont montré que des particules de diamètre aérodynamique supérieur à 100 µm étaient retrouvées dans 65 % des prélèvements effectués avec l'échantillonneur IOM, dans 42 % des prélèvements effectués avec la cassette fermée et dans 32 % des prélèvements effectués avec l'échantillonneur Bouton. Ces très grandes particules représentaient en moyenne 53 % de la masse totale collectée, la variabilité autour de cette moyenne étant elle-même importante (10-95 %). La présence de particules présentant un large diamètre a également été reportée par Martin et Zalk (1998) comme cela a déjà été souligné.

Une troisième explication possible est liée à l'orientation de la cassette fermée durant le prélèvement et à son débit d'utilisation. De l'ensemble des échantillonneurs étudiés, la cassette fermée et bien sûr l'ACCU-CAP™ sont les deux échantillonneurs qui laissent le plus de possibilités quand à leur orientation. Dans cette étude, ces deux échantillonneurs étaient montés dans un dispositif spécial afin que l'orifice d'entrée soit orienté vers l'avant (filtre dans un plan vertical), comme il est de rigueur en France. De par leur conception, c'est dans cette position que se trouvent naturellement les échantillonneurs IOM et Bouton lorsqu'ils sont fixés sur un salarié. Partant du constat

que dans l'étude européenne (Kenny et al., 1997) les échantillonneurs ayant l'efficacité de prélèvement la plus basse vis-à-vis des grandes particules avaient leur orifice d'entrée orienté vers le bas, Baron (1998) souligne l'importance pour un échantillonneur d'avoir son orifice d'entrée orienté vers l'avant. Cette information est rarement disponible. Dans les articles cités précédemment, seul l'article de Perrault et al. (1999) précise que dans leur étude la cassette fermée avait son orifice d'entrée orienté vers le bas. Cette orientation a pour effet de majorer le rapport échantillonneur/cassette fermée. A titre indicatif, une série d'expériences réalisées au cours de cette étude (voir *Annexe 1*) a montré qu'une cassette orientée vers le bas à 45° prélève en moyenne 1,35 fois moins qu'une cassette dont l'orifice d'entrée est orienté vers l'avant. En ce qui concerne le débit d'utilisation de la cassette fermée (un débit de 1 l.min⁻¹ a été utilisé au cours de cette étude alors qu'un débit de 2 l.min⁻¹ est le plus souvent utilisé), les expériences présentées dans l'*Annexe 1* montrent qu'il n'a pas d'influence sur les concentrations mesurées dans la plage de 1 à 2 l.min⁻¹.

Les références comparant les concentrations en poussières de bois mesurées par la cassette fermée à celles obtenues avec une cassette munie d'une capsule ou avec l'échantillonneur Bouton sont moins nombreuses. Les concentrations mesurées lorsqu'une capsule est utilisée sont environ deux fois plus importantes que lors de l'utilisation de la cassette fermée conventionnelle, ce qui montre que la prise en compte des dépôts sur les parois modifie de manière significative les concentrations mesurées. La variabilité du rapport cassette fermée avec capsule/CF est moins importante (1,68-2,45, cf. *Tableau VIII*) que pour le rapport IOM/CF. Ceci peut être dû au plus faible orifice d'entrée que dans le cas de l'échantillonneur IOM, ce qui rend moins probable les dépôts par projection directe. L'orientation de l'échantillonneur a par ailleurs probablement moins d'importance dans la mesure où il est probable que la cassette fermée et la cassette fermée avec capsule sont orientées de la même façon pour une même expérience. En ce qui concerne l'échantillonneur Bouton, nos résultats montrent qu'il prélève significativement plus que la cassette fermée. Ces résultats ne sont toutefois pas confirmés par Harper et Muller (2002), sans qu'une explication plausible puisse être avancée.

RÉSULTATS DE TERRAIN COMPARÉS AUX RÉSULTATS DE LABORATOIRE

Dans un autre article dans la même revue, Görner et al (2010) ont déterminé au laboratoire l'efficacité d'échantillonnage de plusieurs appareils susceptibles de prélever la fraction inhalable en fonction du diamètre aérodynamique des particules dans l'air en mouvement (1m.s⁻¹) et dans l'air calme. Ces appareils sont pour l'essentiel les mêmes que ceux étudiés dans cette étude (IOM, CIP 10-I, ACCU-CAPTM et Bouton). Pour le CIP 10-I cependant, les versions v1 et v2 de l'appareil ont été étudiées au laboratoire alors que l'évaluation de l'échantillonneur CIP 10-I avec le système CALTOOL ou sa comparaison avec la cassette fermée dans l'étude de terrain n'a concerné que la version v1 du CIP 10-I parce que la version v2 n'était pas disponible en nombre suffisant.

Afin d'alimenter la discussion sur la comparaison des résultats obtenus au laboratoire et sur le terrain, les données comparant les concentrations mesurées par les différents échantillonneurs à la concentration mesurée par la cassette fermée (rapport des concentrations) sont synthétisées dans le *Tableau IX*. Pour l'étude de terrain, ce sont les pentes du *Tableau VII* qui ont été reportées pour la totalité des prélèvements (ambiance ou individuel). Pour l'étude de laboratoire, les données présentées correspondent aux mesures réalisées dans l'air en mouvement et dans l'air calme [cf. *Tableau III* de Görner et al (2010)]. Les mesures de terrain et de laboratoire sont complémentaires. Les mesures de laboratoire permettent de comparer l'efficacité des différents échantillonneurs à la courbe d'efficacité conventionnelle de la fraction inhalable pour l'air en mouvement (CEN, 1993 ; ACGIH ,1994-1995 ; ISO, 1995) ou à la courbe d'efficacité proposée par Aitken et al. (1999) pour l'air calme. Les mesures de terrain permettent de moduler les résultats obtenus au laboratoire par la prise en compte pour telle ou telle industrie de la nature particulière des poussières ou des conditions aérauliques.

Globalement, ces données montrent que les résultats obtenus sur le terrain sont plus proches des données obtenues au laboratoire pour les conditions expérimentales d'air calme que pour les conditions expérimentales d'air en mouvement, ce qui semble logique dans la mesure où les vitesses d'air mesurées

sur le terrain étaient faibles (quelques dixièmes de mètre par seconde).

En ce qui concerne le CIP 10-I, seule la version v1 a été comparée sur le terrain à la cassette fermée. En effet, la version v2 (Görner et al. 2010) n'était pas disponible à l'époque en nombre suffisant d'exemplaires pour qu'elle puisse être comparée à la cassette fermée comme ce fut le cas pour les autres échantillonneurs. Des comparaisons directes des versions v1 et v2 du CIP 10-I ont néanmoins pu être effectuées sur le terrain. Dans ce cas, les résultats présentés dans l'*Annexe 2* montrent que, pour le cas particulier des poussières de bois, aucune différence n'est observée entre les deux appareils. On peut ainsi penser que, si la version v2 du CIP 10-I avait pu être comparée à la cassette fermée, les résultats auraient été identiques à ceux obtenus avec la version v1. Les résultats obtenus au laboratoire sur les deux versions sont par contre assez différents que ce soit pour l'air en mouvement ou l'air calme. La raison de la différence de comportement des deux versions du CIP 10-I entre les mesures de laboratoire et de terrain peut être due à des distributions en taille des particules différentes, les données de laboratoire étant acquises sur un domaine de taille plus étendu. La différence de comportement entre les deux versions du CIP 10-I peut aussi être due à la nature des poussières prélevées. Les deux versions du CIP 10-I diffèrent par le dispositif de transmission des poussières entre la fente d'aspiration et le dispositif de collecte comme indiqué dans Görner et al. (2009). Dans l'étude de laboratoire, ce sont des billes de verre qui ont été utilisées dans les différents tests. Dans la version v1 du CIP 10-I, dont le design favorisait le dépôt sur les parois, ces particules étaient probablement plus difficilement remises en suspension par le flux d'air, une fois déposées, que des particules de bois qui par leur morphologie offrent une prise à l'air plus importante. La morphologie des poussières de bois est très irrégulière et présente une grande surface de contact au flux d'air ce qui facilite la remise en suspension des particules préalablement déposées sur la paroi interne de l'échantillonneur.

Toujours en ce qui concerne le CIP 10-I, les mesures de laboratoire ont montré que les réponses de la version v2 du CIP 10-I et de l'échantillonneur IOM étaient proches pour les mesures réalisées dans l'air en mouvement et beau-

TABLEAU IX

Rapports des concentrations mesurées par les différents échantillonneurs et la cassette fermée lors de l'étude de terrain et pour les conditions expérimentales de l'étude de laboratoire (air en mouvement et air calme).

Echantillonneur	Rapport des concentrations mesurées par l'échantillonneur et la cassette fermée		
	Etude de terrain	Etude de laboratoire	
		Air en mouvement	Air calme
IOM	2,02	1,57	2,21
CIP 10-I v1	1,84	1,06	1,25
CIP 10-I v2		1,48	1,81
ACCU-CAP™	1,68	1,23	1,46
Bouton	1,46	1,19	1,88

coup plus éloignées pour les mesures réalisées dans l'air calme. L'explication proposée par Görner et al (2010) pour expliquer ces différences est la présence du chapeau protecteur du CIP-10-I qui masque en partie l'orifice circulaire de captage et qui réduit l'efficacité d'échantillonnage des particules les plus grosses pour les prélèvements dans l'air calme où, dans les conditions de laboratoire, les particules se déplacent du haut vers le bas. Cette différence de comportement des échantillonneurs IOM et CIP 10-I ne se retrouve pas sur le terrain lorsqu'ils sont comparés à la cassette fermée. Clairement ici le mouvement d'ensemble des particules est différent de celui prévalent lors de l'étude de laboratoire.

La morphologie particulière des poussières de bois peut également expliquer les différences obtenues sur le terrain et au laboratoire dans les conditions d'air calme pour l'échantillonneur Bouton lorsqu'il est comparé à la cassette fermée (1,46 comparé à 1,88, cf. *Tableau IX*). On peut en effet penser que dans ce cas les multiples orifices présents sur la surface d'entrée de l'échantillonneur Bouton (environ 400) favorise plus le dépôt de particules aux formes très irrégulières comme les poussières de bois que de particules sphériques comme les billes de verre, ce qui aurait pour effet de diminuer son efficacité lors de prélèvements de poussières de bois.

CONCLUSION

Les résultats obtenus montrent que, comparées à la bouche de CALTOOL qui peut être considérée comme représentative de l'exposition d'une personne placée au même endroit dans les mêmes conditions expérimentales, les concentrations mesurées par les échantillonneurs IOM, CIP10-I v1 et ACCU-CAP™ ne sont pas significativement différentes (respectivement 1,12 ; 0,94 et 0,80 comparés à 1,00), l'échantillonneur Bouton (0,86) étant proche de l'échantillonneur ACCU-CAP™. Bien sûr, ces résultats doivent être pondérés par le nombre limité de données disponibles dans cette étude. Seule l'accumulation de données par d'autres auteurs rendra possible une meilleure différenciation.

Les rapports des concentrations mesurées par ces échantillonneurs aux concentrations mesurées par la cassette fermée sont relativement proches les uns des autres (de 2 à 1,5). Tous les échantillonneurs étudiés prélèvent systématiquement plus que la cassette fermée (2,02 fois plus pour l'échantillonneur IOM, 1,84 fois plus pour l'échantillonneur CIP 10-I v1, 1,68 fois plus pour l'échantillonneur ACCU-CAP™ et 1,46 fois plus pour l'échantillonneur Bouton). C'est l'échantillonneur IOM qui a été le plus souvent comparé à la cassette fermée dans la littérature, les résultats publiés montrant en général

des différences plus importantes par rapport à la cassette fermée que ceux obtenus au cours de ce travail. Deux explications ont été avancées pour expliquer cette différence. La première est la prise en compte lors du prélèvement avec l'échantillonneur IOM de larges particules par projection directe. Cette éventualité, favorisée par la large ouverture de l'échantillonneur IOM, est d'autant plus probable que le prélèvement est réalisé à proximité d'une source de poussières. La deuxième explication est liée à l'orientation de la cassette fermée lors du prélèvement. Plus la cassette fermée est inclinée vers le bas, plus la différence sera importante par rapport à l'échantillonneur IOM.

Lorsque l'on compare des études de laboratoire et de terrain, des différences sont inévitables. L'avantage des mesures de laboratoire est de prendre en compte de manière précise un certain nombre de paramètres mais au prix de conditions expérimentales idéales comme un flux d'air et une concentration en aérosols uniformes. Les mesures de terrain permettent de moduler les résultats obtenus par la prise en compte pour telle ou telle industrie de la nature particulière des poussières. Des explications possibles ont été données pour expliquer les différences observées dans le comportement des différents échantillonneurs entre les études de laboratoire (Görner et al., 2010) et l'étude de terrain principalement pour les échantillonneurs CIP 10-I et Bouton.

Remerciements

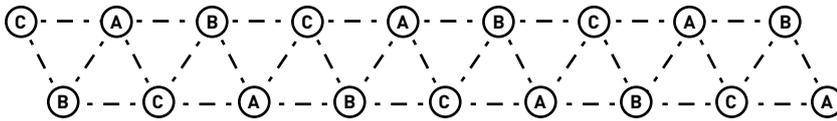
Cette étude a été initiée par Jean-François Fabriès, malheureusement disparu en Avril 2006 alors qu'il travaillait sur ce projet. Les auteurs remercient Madame Martine Demange pour ses commentaires pertinents. Les auteurs remercient également Messieurs Goutet et Barthélémy du Laboratoire Interrégional de Chimie de l'Est pour leur contribution aux choix des entreprises ainsi que le personnel des entreprises pour leur collaboration.

Annexe 1

INFLUENCE DU DÉBIT ET DE L'ORIENTATION DE LA CASSETTE FERMÉE SUR LA CONCENTRATION MESURÉE

FIGURE A1

Dispositif expérimental utilisé



Afin d'étudier l'influence du débit et de l'orientation de la cassette fermée sur la concentration mesurée une expérience a été menée dans une des usines de l'industrie du bois visitée au cours de cette étude. A cet effet, un dispositif a été conçu pour réaliser simultanément 18 prélèvements en ambiance. Ce dispositif, schématisé sur la *Figure A1*, se compose de deux barres en aluminium distantes de 13 cm, situées à environ 160 cm du sol.

Une pompe unique (type VCA15 ; Rietschle, Schopfheim, Germany) reliée à un ensemble d'orifices critiques permettait d'assurer le débit de prélèvement, chaque tête de prélèvement étant reliée à un orifice critique ou à une combinaison de deux pour garantir un débit de prélèvement nominal de 1 ou 2 l.min⁻¹.

Trois types de prélèvements différents identifiés par les lettres A, B ou C ont été réalisés. Les caractéristiques de ces prélèvements étaient les suivantes :

■ A- Débit : 1 l.min⁻¹. Orifice d'entrée de la cassette situé suivant un axe horizontal (filtre dans un plan vertical).

■ B- Débit : 1 l.min⁻¹. Orifice d'entrée de la cassette situé à 45° (la cassette est orientée vers le bas).

■ C- Débit : 2 l.min⁻¹. Orifice d'entrée de la cassette situé suivant un axe horizontal (filtre dans un plan vertical).

L'expérience décrite a été répétée deux fois. Afin de normaliser les résultats, pour chaque expérience (trois au total) la concentration mesurée par chaque cassette a été divisée par la concentration moyenne mesurée par les 18 cassettes de prélèvements. Au total, on obtient 54 concentrations relatives

centrées autour de 1. Si l'on calcule maintenant les concentrations relatives pour chaque type de prélèvement on obtient les résultats suivants :

■ A - concentration moyenne 1,06
intervalle de confiance 0,93-1,19

■ B - concentration moyenne 0,81
intervalle de confiance 0,76-0,86

■ C - concentration moyenne 1,13
intervalle de confiance 1,07-1,20

Ces résultats montrent :

■ qu'il n'y a pas de différences significatives entre les prélèvements de type A ou C. Le débit 1 ou 2 l.min⁻¹ n'influe pas sur la concentration mesurée.

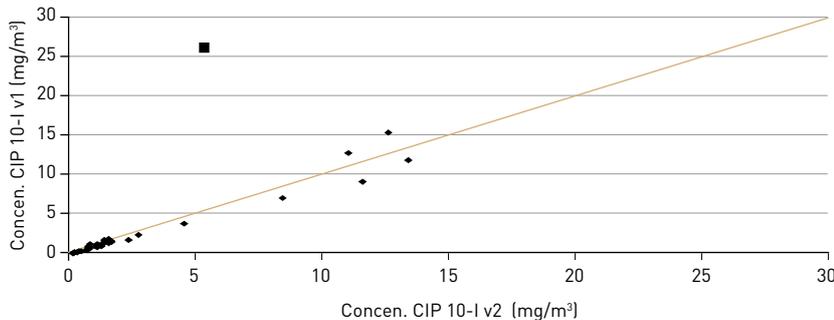
■ que les prélèvements de type B sont significativement différents des prélèvements de type A ou C. L'orientation de la cassette a une influence sur la concentration mesurée. Une cassette orientée vers le bas (à 45°) prélève en moyenne 1,35 fois moins qu'une cassette dont l'orifice d'entrée est situé horizontalement.

Annexe 2

COMPARAISON DES VERSIONS V1 ET V2 DU CIP10-I

FIGURE A2

Relation entre les concentrations mesurées par les deux versions du CIP 10-I



Dans l'étude de terrain, c'est la version v1 du CIP10-I (CIP10-I v1) qui a été comparée à la cassette fermée. Dans l'étude menée au laboratoire (Görner et al., 2010), ce sont les versions v1 et v2 (CIP 10-I v1 et CIP 10-I v2) qui ont été étudiées. La version v2 n'a pas pu être utilisée sur le terrain car elle n'était pas disponible en nombre suffisant. Un prototype était néanmoins disponible, ce qui nous a permis d'effectuer des comparaisons limitées entre les versions v1 et v2.

Au total, 36 couples de prélèvement (CIP10-I v1, CIP10-I v2) ont été réalisés qui se répartissent de la manière suivante :

- 18 couples de prélèvement d'ambiance (entreprises A à F)
- 18 couples de prélèvements individuels (entreprise G).

La *Figure A2* montre la relation obtenue entre les concentrations mesurées par les deux versions (v1 et v2) du CIP10-I.

Sur ce graphique, un point identifié par un carré se situe manifestement à l'écart de l'ensemble des autres. Il correspond à un prélèvement individuel. Une explication possible mais non prouvée pour expliquer cette anomalie était qu'un des CIP10-I était partiellement recouvert par la veste de travail du salarié. Cette hypothèse est d'autant plus plausible que ces prélèvements ont eu lieu en janvier et qu'il faisait froid. Si l'on exclut ce point la pente de la droite de régression est égale à 0,99, les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % étant respectivement égales à 0,93 et 1,06. L'erreur de prélèvement telle que déterminée par le modèle statistique est égale à 13 % (voir le paragraphe traitement des données).

Contrairement aux expériences conduites au laboratoire, ces essais montrent que, pour le cas particulier des poussières de bois, les deux versions (v1 et v2) du CIP 10-I sont équivalentes. Il est ainsi raisonnable de penser que les relations obtenues entre les concentrations mesurées par la version v1 du CIP 10-I et les autres échantillonneurs seraient identiques si la version v2 avait été utilisée dans l'industrie du bois.

BIBLIOGRAPHIE

- ACGIH (1994-1995) Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- AITKEN RJ, BALDWIN EJ, BEAUMONT GC et al. (1999) Aerosol inhalability in low air movement environments. *J Aerosol Sci*; 30: 616-26.
- AIZENBERG V, CHOE K, GRINSHPUN SA et al. (2001) Evaluation of personal aerosol samplers challenged with large particles. *Aerosol Sci*; 32: 779-93.
- AIZENBERG V, GRINSHPUN SA, WILLEKE K. et al (2000) Performance characteristics of the button personal inhalable aerosol sampler. *AIHA J*; 61: 398-404.
- Association Française de Normalisation. (2008) NF X 43-257 Air des lieux de travail Prélèvement d'aérosol à l'aide d'une cassette (orifice 4 mm). La Plaine Saint-Denis, France : AFNOR.
- BARON PA (1998) Personal aerosol sampler design : a review. *Appl Occup Environ Hyg*; 13 : 313-20.
- Comité Européen de Normalisation (CEN). (1993) EN481 Workplace atmospheres-size fraction definitions for measurement of airborne particles. Brussels, Belgium: CEN
- COURBON P, WROBEL R, FABRIÈS JF (1988) A new individual respirable dust sampler: the CIP 10. *Ann Occup Hyg*; 32: 129-43.
- DEMANGE M, ELCABACHE JM, BOULET A. (2003) Mise en solution à froid des membranes en ester de cellulose dans le cadre de l'analyse des aérosols. *Can J Anal Sci Spectrosc.*; 48:362-71.
- DEMANGE M, GENDRE J.C., HERVÉ-BAZIN B et al. (1990) Aerosol evaluation difficulties due to particle deposition on filter holder inner walls. *Ann Occup Hyg*; 34: 399-403.
- DEMANGE M, GÖRNER P, ELCABACHE JM et al. (2002) Field comparison of 37 mm closed-face filter cassettes and IOM samplers. *Appl Occup Environ Hyg*; 17: 200-8.
- DEVOCHT M, HUIZED, PRAUSE M et al. (2006) Field comparison of inhalable aerosol samplers applied in the European rubber manufacturing industry. *Int Arch Occup Environ Health*; 79: 621-9.
- FAUVELS, BASSOG., WITSCHGERO. (2003) Laboratory and field testing of a calibration tool (CALTOOL) for evaluating personal aerosol samplers performances. Abstracts of the European Aerosol Conference. *J. Aerosol Sci*; 34 (Suppl. 2): S1177-8.
- GOLLE JW, PAIK NW. (1985) A comparison of iron oxide fume inside and outside of welding helmets. *AIHA J*; 46: 89-93.
- GÖRNER P, SIMON X, WROBEL R et al. (2010) Laboratory study of selected personal inhalable aerosol samplers. *Ann Occup Hyg*; 54: 165-87.
- GÖRNER P, WROBEL R, SIMON X. (2009) High efficiency CIP 10-I personal inhalable aerosol samplers. In *Inhaled Particles X*, (23-25 September 2008, Manchester). *J Phys: Conf Ser*; 151, 012061, IOP Publishing, doi: 10.1088/1742-6596/151/1/012061.
- HARPER M, AKBAR MZ, ANDREW ME. (2004) Comparison of wood-dust aerosol size-distributions collected by air samplers. *J. Environ Monit* ; 6: 18-22.
- HARPER M, DEMANGE M (2007) Analytical performance criteria concerning sampler wall deposits in the chemical analysis of airborne metals. *J Occup Environ Hyg*; 4: D81-6.
- HARPER M, MULLER BS. (2002) An evaluation of total and inhalable samplers for the collection of wood dust in three wood products industries. *J. Environ. Monit* ; 4: 648-56.
- IARC (1995) Wood dust and formaldehyde. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol.62, Lyon, France: International Agency for Research on Cancer.
- Institut National de Recherche et Sécurité. (2005) MétroPol. Fiche N° 003: Métaux. Métalloïdes. Vandœuvre-les-Nancy, France, INRS.
- International Organization for Standardisation (ISO). (1995) ISO 7708 Air quality-particle size fraction definitions for health-related sampling. Geneva, Switzerland: ISO.
- International Organization for Standardisation (ISO). (2003) ISO 15767 Workplace atmospheres-Controlling and characterizing errors in weighing collected aerosols. Geneva, Switzerland: ISO.
- KALATOOR S, GRINSHPUN SA, WILLEKE K et al. (1995) New aerosol sampler with low wind sensitivity and good filter collection uniformity. *Atmos Environ*; 29: 1105-12.
- KAUPPINEN T, VINCENT R, LIUKKONEN T et al. (2006) Occupational exposure to inhalable wood dust in the member states of the European union. *Ann Occup Hyg*; 50: 549-61.
- KENNY LC, AITKEN R, CHALMERS C et al. (1997) A collaborative European study of personal inhalable aerosol sampler performance. *Ann Occup Hyg*; 41: 135-53.
- KENNY LC, AITKEN RJ, BALDWIN PEJ et al. (1999) The sampling efficiency of personal inhalable aerosol samplers in low air movement environments. *J Aerosol Sci*; 30: 627-38.
- LAMONT MOORE L, DUBE DJ and BURK T (1990) Improved sampling and recovery of wood dust using MSA respirable dust cassettes. *AIHA J*; 51: A 475-6
- LI S, LUNDGREN D, ROVELL-RIXX D. (2000) Evaluation of six inhalable aerosol samplers. *AIHA J*; 61: 506-16.
- MARK D, AITKEN R, WITSCHGER O et al. (2004) Development of a novel calibration tool workplace aerosol samplers, final report SMT4-CT98-2254. Sheffield, UK: HSL.
- MARK D, AITKEN RJ, BEAUMONT G et al. (2000) Development of a novel calibration tool for workplace aerosol samplers – review of progress of EU Project. *J. Aerosol Sci.*, 31 (Suppl. 1): S392-3.
- MARK D AND VINCENT JH (1986) A new personal sampler for airborne total dust in workplaces. *Ann Occup Hyg*; 30: 89-102.
- MARTIN JR, ZALK DM (1998) Comparison of total dust/inhalable dust sampling methods for the evaluation of airborne wood dust. *Appl Occup Environ Hyg*; 13: 177-82.
- PERRAULT G, DROLET D, CLOUTIER Y. (1996) Comparaison de systèmes d'échantillonnage pour la collecte de poussières de bois inhalables. Rapport 94-077. Québec, Canada : Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST).

PERRAULT G, DROLET D, FORTIN Z et al. (1999). Recherche de facteurs de comparaison entre les systèmes d'échantillonnage de poussières inhalables. Rapport R-231. Québec, Canada : Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST).

PUSKAR MA, FERGON SM, HARKINS JM et al. (1992) Gravimetric determination of airborne dust by using a filter cartridge inside a closed-face 37-mm polystyrene cassette. *AIHA J*; 53: 692-8.

PUSKAR MA, HARKINS JM, MOOMEY JD et al. (1991) Internal wall losses of pharmaceutical dusts during closed-face, 37-mm polystyrene cassette sampling. *AIHA J*; 52: 280-6.

TATUM VL, RAY AE, ROVELL-RIXX DC. (2001) The Performance of Personal Inhalable Dust Samplers in Wood-Products Industry Facilities. *Appl Occup Environ Hyg*; 16: 763-9.

TSAI PJ, VINCENT JH, WAHL G et al. (1995) Occupational exposure to inhalable and « total » aerosol in the primary nickel production industry. *Occup Environ Med*; 52: 793-9.

VAUGHAN NP, CHALMERS CP, BOTHAM RA. (1990) Field comparison of personal samplers for inhalable dust. *Ann Occup Hyg*; 34: 553-73.