

COMPARAISON DE DEUX APPAREILS À LECTURE DIRECTE (FM-7400 ET FIBRECHECK FC-2) PAR RAPPORT À LA MICROSCOPIE OPTIQUE À CONTRASTE DE PHASE POUR LE MESURAGE DE LA CONCENTRATION EN NOMBRE DE FIBRES DANS L'AIR

Traduction de l'article *Comparison of Two Direct-reading Instruments (FM-7400 and Fibrecheck FC-2) with Phase Contrast Optical Microscopy to Measure the Airborne Fibre Number Concentration*. In : *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 47, n° 5, pp. 413-426, 2003.

Les appareils à lecture directe pour le mesurage de la concentration en nombre de fibres dans l'air sont d'une utilisation de plus en plus fréquente. La réponse de deux de ces appareils (FM-7400 et Fibrecheck FC-2) a été comparée à la méthode conventionnelle par prélèvement sur filtre et comptage par microscopie à contraste de phase. Quatre types de fibres ont été étudiées pour différents niveaux de concentration et d'humidité relative de l'air. Le FM-7400 peut être calibré par le fabricant sur deux niveaux de sensibilité différents (standard et haute).

Pour les essais pour lesquels il était réglé sur le niveau de sensibilité sur lequel il avait été calibré, le rapport entre la concentration mesurée par l'appareil et la concentration obtenue par la méthode conventionnelle varie dans le domaine (0,5 – 1) pour les différents types de fibres étudiées (chrysotile, verre et céramique). Le Fibrecheck FC-2 est un appareil nettement moins polyvalent. Sur la base d'un étalonnage permettant une détection correcte des fibres d'amiante, il surestime de manière très importante la concentration en fibres minérales artificielles. Dans l'état où il est normalement calibré un aérosol fin de chrysotile est très mal détecté. Pour les fibres minérales artificielles sa réponse dépend fortement de la nature des fibres. Ces appareils nécessitent d'être calibrés sur le type de fibres que l'on souhaite étudier. Malheureusement cette opération n'est pas toujours accessible à l'utilisateur et pourra demander le concours d'un laboratoire spécialisé, le fabricant lui-même n'étant pas toujours en mesure de réaliser cette opération.

INTRODUCTION

Il existe un nombre important de méthodes utilisant différents principes pour la mesure instantanée des aérosols. Ces appareils sont en général appelés appareils à lecture directe ou appareils de mesure en continu (Görner et Fabriès, 1990). Parmi ceux-ci, quelques-uns sont dédiés au mesurage de la

concentration en nombre de fibres dans l'air. Avec le renforcement de la réglementation sur l'amiante, ces appareils semblent de plus en plus utilisés en France pour une évaluation rapide des concentrations.

Le mesurage automatique de la concentration en fibres dans l'air est basé sur l'analyse de la lumière diffusée par les particules. L'intensité de la

- Appareils à lecture directe
- Concentration en nombre de fibres
- Microscopie optique à contraste de phase

► Edmond KAUFFER⁽¹⁾, Patrick MARTIN⁽²⁾, Michel GRZEBYK⁽¹⁾, Mario VILLA⁽²⁾, Jean-Claude VIGNERON⁽¹⁾

⁽¹⁾ INRS, Département Métrologie des polluants

⁽²⁾ INRS, Département Ingénierie des procédés

COMPARISON OF TWO DIRECT-READING INSTRUMENTS (FM-7400 AND FIBRECHECK FC-2) WITH PHASE CONTRAST OPTICAL MICROSCOPY TO MEASURE THE AIRBORNE FIBRE NUMBER CONCENTRATION

The use of direct-reading instruments to measure the airborne fibre number concentration is on the increase. The response of two of these instruments (FM-7400 and Fibrecheck FC-2) was compared with the conventional method of sampling on filters and counting by phase contrast microscopy. Four types of fibres were studied at different concentrations and relative humidity levels. The FM-7400 can be calibrated by the manufacturer for two different levels of sensitivity (standard and high). For the tests where it was set to the sensitivity level with which it had been calibrated, the ratio of the concentration measured by the instrument to the concentration obtained by the conventional method varied in the range 0.5-1 for the different types of fibres studied (chrysotile, glass wool and ceramic fibres). The Fibrecheck FC-2 is a much less versatile instrument. On the basis of a calibration allowing correct detection of asbestos fibres, it greatly overestimated the concentration of man-made mineral fibres. In its normal calibration state a fine chrysotile aerosol was poorly detected. For man-made mineral fibres, the response was highly dependent on the nature of the fibres. These instruments require calibration with the type of fibres to be studied. Unfortunately, this operation is not always accessible to the user and may require the services of a specialized laboratory, as the manufacturer is not always in a position to carry this out.

- Direct-reading instruments
- Fibre number concentration
- Phase contrast optical microscopy

lumière diffusée est donnée par la théorie de MIE pour les particules sphériques (Mie, 1908). Cette théorie a été étendue au cas des particules cylindriques par Kerker et Matijevic (1961). Avant d'atteindre la cellule de mesure, les fibres sont alignées. Pour des fibres conductrices un alignement est obtenu sous l'action d'un champ électrique, (Lilienfeld et al., 1979 ; Lilienfeld, 1987 ; Cluff et Patitsas, 1992). Des fibres ayant une susceptibilité magnétique suffisante peuvent également être alignées sous l'action d'un champ magnétique, (Timbrell, 1975). Dans ce cas les fibres sont alignées parallèlement ou perpendiculairement au champ bien que certaines fibres s'alignent suivant des directions intermédiaires. L'alignement des fibres parallèlement au sens de l'écoulement dans un gradient de vitesse a aussi été utilisé par d'autres auteurs (Rood et al., 1992 ; Prodi et al., 1982).

De l'analyse de la littérature il ressort que deux appareils ont été plus particulièrement testés. Le Vickers M88 basé sur un alignement magnétique des fibres ne semble plus commercialisé actuellement. Les mesures effectuées avec cet appareil ont montré une bonne corrélation avec les comptages manuels pour les prélèvements effectués dans l'amiante textile et une corrélation satisfaisante dans le secteur des garnitures de frein, (Jones et Gale, 1982). Des étalonnages sont nécessaires pour chaque variété de fibres, (Du Toit, 1982). L'autre appareil est le FAM (Fiber Aerosol Monitor) qui a été développé par le NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), l'EPA (Environmental Protection Agency) et le Bureau des Mines Américain, (Baron, 1993). La version actuelle de l'appareil est le FM-7400. Les fibres sont alignées sous l'action d'un champ électrique.

Actuellement en France deux appareils sont commercialisés : le FM-7400 d'origine américaine, dont les premières versions remontent à une vingtaine d'années et le Fibrecheck FC-2 d'origine anglaise, de fabrication plus récente. Les avantages des appareils à lecture directe sont bien connus (Baron, 1994). Ils permettent d'obtenir rapidement des informations sur la concentration pour estimer les niveaux de risque, pour évaluer les dispositifs de contrôle et permettre aux personnes exposées de modifier leur comportement et réduire ainsi les risques encourus. Leur réponse est plus rapide que les méthodes conventionnelles

qui nécessitent d'envoyer un prélèvement pour analyse à un laboratoire.

Des résultats préliminaires concernant ces appareils ont été obtenus essentiellement sur le terrain dans deux usines produisant des fibres minérales artificielles (fibres de céramique et de laitier) avec en complément quelques résultats sur l'amiante chrysotile obtenus en laboratoire (Kauffer et al., 2000). Des résultats plus complets obtenus en faisant varier la nature des fibres testées, leur niveau de concentration et le degré hygrométrique de l'air font l'objet du présent article.

MÉTHODOLOGIE

DESCRIPTION DES APPAREILS

FM-7400

Tel que décrit dans le manuel d'utilisation le FM-7400 est un appareil à la pointe de la technologie conçu pour prélever l'air en continu, détecter en temps réel la présence de fibres dans l'air et compter automatiquement les fibres correspondant aux critères de taille définis par l'utilisateur. Les fibres sont alignées dans un champ électrique oscillant et les impulsions lumineuses résultant de l'action d'un laser hélium-néon polarisé fonctionnant à 632,8 nm sont détectées par un photomultiplicateur. La fréquence, la phase et la forme des impulsions permettent de séparer les fibres d'intérêt des particules. L'appareil est étalonné par le constructeur avec des fibres d'amiante.

L'appareil est conçu pour un débit de 2 L/min. Des temps de prélèvement de 1, 10, 30 minutes ; 1, 4 et 8 heures peuvent être programmés. Les fibres prises en compte sont celles dont le diamètre est compris entre 0,2 et 20 μm . La coupure en longueur permet le choix entre les valeurs de 3, 5, 10 et 20 μm , le seuil de coupure à 5 μm ayant été retenu pour cette étude. Pour un fonctionnement correct, l'humidité relative de l'air doit être comprise entre 30 et 90 %. La gamme de mesure s'étend de 10^{-4} à 25 fibres/mL. L'appareil est transportable.

Fibrecheck FC-2

Le Fibrecheck FC-2 est un instrument portatif pour le mesurage de la concentration des aérosols fibreux dans

l'air. Le débit d'air prélevé est de 2 L/min. Un débit turbulent à travers une tuyère transporte les particules quelle que soit leur orientation à l'intérieur du volume de détection. Le traitement électronique du signal de la lumière émise par un faisceau laser et diffusée par les particules permet de compter le nombre total de particules et le nombre de fibres.

Sur l'écran de contrôle de l'appareil, le nombre total de particules détectées, la concentration gravimétrique et la concentration en nombre de fibres dans le domaine [0 - 5 fibres/mL] sont indiqués. Les fibres prises en compte sont celles de diamètre supérieur à 0,2 μm et de rapport longueur sur diamètre supérieur à 3 : 1.

CALIBRAGE DES APPAREILS PAR LE FABRICANT

FM-7400

Lors des premières mesures effectuées avec cet appareil les concentrations mesurées pour des fibres de chrysotile générées dans une cellule à empoussièrément étaient très inférieures à celles mesurées par la méthode conventionnelle, (Kauffer et al., 2000). Cela a conduit le fabricant à procéder à un nouveau calibrage de l'appareil pour lequel la sensibilité a été réglée en position haute (high sensitivity).

Deux sensibilités sont disponibles sur l'appareil : sensibilité haute et sensibilité standard. Il est apparu au cours du déroulement de l'étude que l'appareil, sans raison apparente, pouvait passer du niveau haut de sensibilité sur lequel il avait été calibré au niveau standard. Pour cette raison, certaines expériences réalisées au cours de cette étude l'ont été avec l'appareil réglé sur le mode de sensibilité haute, d'autres avec l'appareil réglé sur le mode de sensibilité standard.

L'existence de ces deux niveaux de sensibilité n'est pas mentionnée dans la notice d'utilisation fournie avec l'appareil. La procédure à suivre pour passer d'un mode à l'autre nous a été communiquée par le revendeur de l'appareil (Instructions for special two-level sensitivity selection). Seule la présence de la lettre H en face de la ligne Fiber Length, soit sur l'écran de l'appareil, soit sur l'impression papier, indique que l'appareil est en mode de sensibilité haute. En mode de sensibilité standard aucune indication apparaît.

Fibrecheck FC-2

Tel qu'il est fourni par le constructeur, l'appareil est calibré sur des fibres de caféine générées par chauffage (état initial). Comme dans cet état, les résultats préliminaires, (Kauffer et al., 2000) ont montré que l'appareil n'avait pas une sensibilité suffisante pour détecter les fibres de chrysotile générées dans une cellule à empoussièrément, le constructeur a procédé à l'INRS à une modification de l'étalonnage initial (état modifié). Par la suite il est apparu que cet étalonnage n'était pas satisfaisant pour évaluer la concentration en fibres minérales artificielles ce qui nous a conduit à demander au constructeur de l'appareil de le remettre dans son état initial. Une partie des expériences a donc été réalisée avec l'appareil tel qu'habituellement utilisé (état initial), une autre partie avec un appareil dont l'étalonnage avait été modifié (état modifié).

HISTORIQUE DES APPAREILS

L'historique des appareils pour la période avril 1998 – avril 2000, incluant les pannes ainsi que les différents étalonnages ou modifications d'étalonnage figure dans le *Tableau 1*.

PRÉLÈVEMENTS

Les prélèvements ont été réalisés dans une cellule à empoussièrément, (Rihn et al., 1996). L'aérosol est échantillonné en même temps par trois appa-

reils (FM-7400, Fibrecheck FC-2 et un appareil prototype). Les résultats du prototype ne sont pas présentés dans cet article car il est encore en développement et qu'il n'est pas commercialisé. Parallèlement trois filtres (Millipore® quadrillés, diamètre 25 mm, diamètre de pore 0,8 µm, réf. AAW 60250C) montés sur tête Gelman® en Delrin sont prélevés pour analyse en microscopie optique à contraste de phase. Dans le but de mesurer la distribution en longueur et diamètre des fibres présentes dans l'atmosphère deux points de prélèvement supplémentaires sont utilisés. Dans ce cas le filtre était un filtre Nucléopore® en polycarbonate de diamètre de pore 0,4 µm, monté également sur une tête Gelman®. Pour les prélèvements sur filtre, une pompe unique (Rietschle®, type YCA 15) est utilisée. Au niveau de chaque tête de prélèvement, le débit (1 L/min) est assuré par des orifices critiques, préalablement étalonnés au laboratoire en utilisant des membranes filtrantes de même nature.

ANALYSES

Sur les filtres Millipore®, les fibres ont été dénombrées par microscopie optique à contraste de phase selon la norme X43-269 (AFNOR, 1991). Afin d'augmenter la précision des comptages, les critères d'arrêt ont été modifiés (100 fibres ou 200 champs au lieu de 100 fibres ou 100 champs). Les fibres prises en compte sont celles de longueur supérieure à 5 µm, de diamètre inférieur

à 3 µm et dont le rapport longueur sur diamètre est supérieur à 3. Chaque filtre a été compté par deux opérateurs.

La distribution en longueur et en diamètre des fibres a été déterminée sur les filtres Nucléopore® par microscopie électronique à balayage en suivant un protocole européen, (WHO, 1985) avec un grossissement de x 5000 pour le chrysotile et de x 2000 pour les fibres minérales artificielles.

DÉROULEMENT DES ESSAIS

Les recommandations les plus importantes données par les fabricants pour une utilisation correcte des appareils concernent l'humidité relative de l'air et la concentration en nombre de fibres (voir le paragraphe description des appareils). Dans le cas du FM-7400 par exemple, l'humidité relative de l'air doit être comprise entre 30 et 90 %. Ce n'est pas difficile à comprendre car l'humidité relative de l'air peut modifier la conductivité de la surface des fibres et empêcher un alignement correct des fibres dans le champ électrique de l'appareil.

C'est la raison pour laquelle les différents tests ont été effectués suivant un plan d'expérience où l'humidité relative de l'air et la concentration en nombre de fibres étaient variables pour les différentes fibres étudiées (chrysotile, fibres de verre, roche et céramique).

Trois niveaux ont été retenus pour l'humidité relative de l'air (1 = 20 % ; 2 = 45 % ; 3 = 70 %). Pour la concentration en nombre de fibres, quatre niveaux ont été retenus. La plage de concentration visée, mais qui n'a pas toujours été respectée allait de 0,1 f/mL pour le niveau 1, à 4 fibres/mL pour le niveau 4. En fait comme le FM-7400 a été utilisé pour aider à contrôler la concentration visée la plage de concentrations n'a été atteinte qu'imparfaitement en fonction du mode de sensibilité sur lequel l'appareil était réglé (voir le paragraphe Calibrage des appareils par le fabricant. Comme il est bien connu que les microscopistes ont tendance à surestimer le nombre de fibres lorsque les filtres sont peu chargés et les sous-estimer lorsque les filtres sont très chargés, le temps de prélèvement était fonction de la concentration visée allant de 10 min pour le niveau 4 à 380 min pour le niveau 1.

TABLEAU 1

Historique des appareils pendant la période Avril 1998 – Avril 2000
Historical overview of the instruments over the period April 1998-April 2000

FM-7400	Fibrecheck FC-2
Avril 1998 : Étalonnage par MIE (sensibilité haute)	
	Décembre 1998 : Étalonnage de l'appareil par le fabricant avec du chrysotile à l'INRS
Juillet 1999 : Nettoyage effectué par le revendeur	
Septembre 1999 : Étalonnage par MIE (sensibilité haute)	
	Novembre 1999 : Étalonnage de l'appareil chez le fabricant avec des fibres de caféine
Décembre 1999 : Problème de débit. Réparation effectuée par le revendeur	
Février 2000 : Court circuit sur l'alimentation laser. Réparation effectuée par le revendeur.	

Le plan d'expérience, identique pour chaque type de fibre, est présenté dans le *Tableau II*. Toutes les combinaisons entre les niveaux d'humidité relative et de concentration ont été testées, quatre combinaisons l'étant deux fois.

TABLEAU II

Structure du plan d'expérience
Structure of experimental design

Numéro de la ligne	Niveau d'humidité relative de l'air	Niveau de la concentration en nombre de fibres
1	3	4
2	3	1
3	2	2
4	3	3
5	3	2
6	2	1
7	2	2
8	2	4
9	2	1
10	1	3
11	1	2
12	2	3
13	1	4
14	2	3
15	2	4
16	1	1

Pour l'humidité relative de l'air trois niveaux ont été étudiés (1 = 20 % ; 2 = 45 % ; 3 = 70 %).
Pour la concentration en nombre de fibres quatre concentrations ont été retenues. La plage de concentration visée, mais qui n'a pas toujours été respectée allait de 0,1 fibre/ml pour le niveau 1, à 4 fibres/ml pour le niveau 4.

TRAITEMENT DES DONNÉES

Pour chaque expérience, la concentration de référence est la moyenne des concentrations mesurées par les deux opérateurs. Le calcul de la concentration et des effets étudiés est effectué par méthode Bayésienne à l'aide du logiciel BUGS qui fournit également l'écart-type et l'intervalle de confiance des paramètres, (Spiegelhalter et al., 1996).

Dans cette approche basée sur des simulations on suppose que le nombre de fibres comptées par le compteur c (1 à 2) pour le prélèvement p (1 à 3) de la ligne m (1 à 16) du plan d'expérience

suit une loi de Poisson de moyenne égale à :

$$\frac{n \times s \times V}{S} \times C_{m,p} \times \exp(\alpha_c)$$

où :

n est le nombre de champs observés
s est la surface du réticule

S est la surface utile du filtre de prélèvement

V est le volume d'air prélevé

C_{m,p} est la concentration moyenne mesurée par les deux compteurs pour le prélèvement p de la ligne m du plan d'expérience

exp(α_c) représente le rapport entre la concentration mesurée par le compteur c et la concentration géométrique moyenne mesurée par les compteurs 1 et 2

On suppose par ailleurs que les trois concentrations mesurées pour chaque ligne m du plan d'expérience suivent une loi lognormale de moyenne Log(C_m) et de variance σ²_p. Le coefficient de variation caractérisant l'homogénéité des prélèvements simultanés dans la chambre est égal à :

$$100 \times \sqrt{\exp \sigma^2_p - 1}$$

Les effets liés aux différents appareils, aux différents taux d'humidité relative de l'air ou aux différents niveaux de la concentration en nombre de fibres sont déterminés en supposant que :

$$\text{Log}(Y_{a,m}) = \text{Log}(C_m) + \beta_a + \gamma_{ah} + \delta_{ac} + \epsilon_{am}$$

où :

Y_{a,m} est la concentration mesurée par l'appareil a pour la ligne m du plan d'expérience.

C_m est la concentration moyenne dans la cage déterminée par la méthode conventionnelle.

exp(β_a) est le rapport entre la concentration mesurée par l'appareil a et la concentration moyenne mesurée par les deux opérateurs. C'est ce qui est appelé effet appareil dans les *Tableaux VI à X*. Un rapport égal à r signifie que la concentration mesurée par l'appareil a après correction des effets liés à l'humidité et à la concentration est égale à r fois la concentration mesurée par la méthode conventionnelle.

exp(β_a + γ_{ah}) est le rapport entre la concentration mesurée par l'appareil a et la concentration moyenne mesurée par les deux opérateurs pour le niveau d'humidité h (effet appareil par niveaux d'humidité, *Tableaux VI à X*). Un rap-

port égal à r signifie que la concentration mesurée par l'appareil a pour le niveau d'humidité h après correction des effets liés à la concentration est égale à r fois la concentration mesurée par la méthode conventionnelle.

exp(γ_{ah1} - γ_{ah2}) représente le rapport des concentrations mesurées par l'appareil a pour deux niveaux d'humidité h₁ et h₂ (effet humidité, *Tableaux VI à X*). Un rapport égal à r signifie que la concentration mesurée par l'appareil a pour le niveau d'humidité h₂ après correction des effets liés à la concentration est égale à r fois la concentration mesurée pour le niveau d'humidité h₁ (h₁/h₂).

exp(δ_{ac1} - δ_{ac2}) représente le rapport des concentrations mesurées par l'appareil a pour deux niveaux de la concentration en nombre de fibres c₁ et c₂. (effet concentration, *Tableaux VI à X*). Un rapport égal à r signifie que la concentration mesurée par l'appareil a pour le niveau de concentration c₁ après correction des effets liés à l'humidité est égale à r fois la concentration mesurée pour la concentration c₂ (c₁/c₂).

ε_{am} est l'erreur résiduelle dont on suppose qu'elle suit une loi normale centrée de variance σ²_a + σ²_p. Le coefficient de variation exprimé en pourcentage caractérisant la reproductibilité de chaque appareil est égal à :

$$100 \times \sqrt{\exp \sigma^2_a - 1}$$

La reproductibilité mesure la capacité de l'appareil à produire des résultats identiques pour des conditions expérimentales identiques.

RÉSULTATS

Pour les quatre types de fibres générées (chrysotile, fibres de verre, roche ou céramique), le *Tableau III* indique les cinq paramètres (moyenne géométrique et écart-type géométrique des longueurs et diamètres, coefficient de corrélation entre le logarithme du diamètre et le logarithme de la longueur) qui caractérisent la distribution en taille des fibres dans le cas d'une distribution lognormale bivariée, (Schneider and Holst, 1983). La distribution en longueur et en diamètre des fibres générées est également représentée sous forme d'histogramme sur les *Figures 1 à 4*.

TABLEAU III

Caractéristiques des aérosols générés Characteristics of the aerosols generated

Type de fibres	Diamètre moyen géométrique (µm)	Ecart-type Géométrique	Longueur moyenne géométrique (µm)	Ecart-type géométrique	Coefficient de corrélation
Chrysotile	0,19	1,42	2,38	1,71	0,11
Verre	0,70	1,94	4,66	1,95	0,37
Roche	0,34	1,72	5,23	2,00	0,32
Céramique	1,28	1,50	6,17	1,75	0,72

TABLEAU IV

Concentrations mesurées par la méthode conventionnelle et les différents appareils pour les différents types de fibres étudiées et les différentes lignes des plans d'expérience Concentrations measured by the conventional method and by the different instruments for the different types of fibres studied and the different lines of the experimental design

Ligne	HU	1 - Chrysotile			2 - Fibres de verre			3 - Fibres de roche			4 - Fibres de céramique			5 - Fibres de verre		
		MO	FM	FC	MO	FM	FC	MO	FM	FC	MO	FM	FC	MO	FM	FC
1	70	2,683	2,47	1,49	12,74	5,06		2,820	1,940		4,675	2,5	2,63	8,227	3,13	1,399
2	70	0,085	0,0689	0,093	0,122	0,13	2,12	0,092	0,058	0,255	0,117	0,079	0,129	0,127	0,0529	0,007
3	45	0,333	0,388	0,266	0,645	0,66		0,387	0,251	1,697	0,808	0,666	1,825	0,525	0,263	0,12
4	70	0,494	0,611	0,305	1,475	1,4		0,763	0,476	3,358	1,43	1,17	3,038	0,898	0,542	0,276
5	70	0,355	0,304	0,131	0,658	0,72		0,277	0,242	1,896	0,682	0,645	1,969	0,437	0,249	0,134
6	45	0,078	0,063	0,001	0,147	0,135	2,56	0,153	0,053	0,778	0,215	0,0997	0,29	0,082	0,0492	0,006
7	45	0,349	0,321	0,001	0,707	0,675		0,502	0,242	2,496	0,925	0,539	1,529	0,372	0,254	0,199
8	45	2,368	2,72	1,64	7,363	5,35		8,802	2,070		4,235	2,27		2,61	1,91	1,29
9	45	0,087	0,0703	0,000	0,138	0,141	2,063	0,227	0,051	1,254	0,098	0,0955	0,51	0,075	0,0503	0,009
10	20	0,707	0,611	0,316	2,788	1,39		5,452	0,487		1,385	0,979	3,349	1,132	0,508	0,684
11	20	0,345	0,376	0,281	0,972	0,679		3,207	0,242		0,738	0,432	1,474	0,658	0,25	0,357
12	45	0,683	0,616	0,537	2,122	1,33		4,018	0,495		1,205	1,05	2,521	0,777	0,497	0,412
13	20	2,476	2,41	1,43	14,10	5,09		12,368	2,030		4,398	2,04				
14	45	0,576	0,63	0,45	1,682	1,36		2,312	0,484		1,105	0,953	2,507	0,538	0,495	0,311
15	45	2,368	2,61	1,85	9,413	4,97		20,223	1,950		4,407	2,68		2,927	1,89	1,706
16	20	0,059	0,0679	0,001	0,222	0,134	3,612	0,620	0,056	3,558	0,108	0,117	0,452	0,095	0,0505	0,053

HU=Humidité relative de l'air en pourcent dans la cellule à empoussièrément.

MO=Concentration mesurée par la méthode conventionnelle.

FM= Concentration mesurée par le FM-7400.

FC= Concentration mesurée par le Fibrecheck FC-2.

Commentaires :

FM - 7400: réglé sur la sensibilité haute pour les expériences 1, 4 et 5, en position standard pour les expériences 2 et 3. retour chez le revendeur pour entretien entre les lignes 12 et 13 de l'expérience 2.

Fibrecheck FC - 2: état modifié pour les expériences 1, 2 et 3, état initial pour les expériences 4 et 5.

Pour l'expérience 5, quatre valeurs considérées comme anormales mesurées par la méthode conventionnelle ont été supprimées ainsi qu'une ligne du plan d'expérience.

Les valeurs en caractères gras n'ont pas été prises en compte dans l'analyse.

Pour les différentes lignes du plan d'expérience et les différentes fibres étudiées les résultats obtenus par les trois appareils ainsi que la concentration moyenne déterminée par la méthode conventionnelle (moyenne sur trois points de prélèvement et deux compteurs) sont présentés dans le *Tableau IV*. Il apparaît quelquefois dans le cas de faibles concentrations que la réponse de

l'appareil ne semble pas corrélée aux concentrations mesurées par la méthode conventionnelle, comme s'il existait une limite de détection. Ces valeurs qui n'ont pas été prises en compte dans l'analyse des résultats sont présentées en caractères gras dans le tableau. Apparaissent également en caractères gras dans le tableau les valeurs mesurées par le Fibrecheck FC-2 pour lesquels la

concentration moyenne obtenue par la méthode conventionnelle est supérieure à 4 fibres/mL. Ces valeurs n'ont également pas été prises en compte dans l'analyse des résultats dans la mesure où la plage d'utilisation conseillée par le fabricant du Fibrecheck FC-2 s'étend de 0 à 5 fibres/mL. Les données du *Tableau IV* sont également représentées sur la *Figure 5*. Sur cette figure la concentration

TABLEAU V

Valeurs des paramètres et leur intervalle de confiance mesurant l'effet compteur et l'homogénéité dans la cage pour les cinq expériences. Le nombre de mesures effectuées est également indiqué

Values of the parameters and their confidence intervals measuring counter effect and homogeneity in the chamber for the five experiments (the numbers of measurements taken are also indicated)

	Effet compteur				Homogénéité de la chambre			
	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure
1 - Chrysotile	1,01	0,98	1,04	96	13,5	10,3	17,5	48
2 - Fibres de verre	1,16	1,13	1,19	96	6,01	3,80	8,76	48
3 - Fibres de roche	1,03	1,00	1,06	96	6,20	3,75	9,03	48
4 - Fibres de céramique	0,91	0,89	0,94	96	13,2	10,1	17,2	48
5 - Fibres de verre	1,08	1,05	1,11	86	18,0	14,0	23,2	43

TABLEAU VI

Expérience 1 Chrysotile

Experiment 1: chrysotile

	Niveau du facteur contrôlé	FM-7400				Fibrecheck FC-2			
		Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure
Effet appareil		1,00	0,90	1,09	16	0,76	0,64	0,89	12
Reproductibilité appareil		7,83	2,30	19,6		16,0	3,13	40,6	
Effet appareil par niveau d'humidité	1	1,04	0,85	1,24	4	0,76	0,54	1,02	3
	2	0,99	0,87	1,13	8	0,93	0,72	1,21	5
	3	0,97	0,80	1,16	4	0,63	0,49	0,80	4
Effet humidité	2/1	0,96	0,76	1,20	8/4	1,26	0,87	1,78	5/3
	3/1	0,94	0,71	1,22	4/4	0,85	0,56	1,24	4/3
Effet concentration	2/1	0,89	0,69	1,13	4/4	2,30	1,16	4,08	4/4
	3/1	1,04	0,79	1,33	4/4	1,02	0,69	1,48	3/4
	4/1	1,05	0,81	1,35	4/4	1,03	0,70	1,49	1/4

Valeurs des effets appareils, des effets appareils par niveau d'humidité relative, des effets humidités et concentrations ainsi que de la reproductibilité des appareils (les différents niveaux pour l'humidité et la concentration sont donnés dans le tableau 2, l'explication des différents paramètres mesurés est donnée dans le paragraphe traitement des données).

Pour les effets humidités et concentrations les valeurs en caractères gras correspondent à un effet significatif

mesurée par les deux appareils à lecture directe est comparée pour toutes les fibres testées à la concentration mesurée par la microscopie optique à contraste de phase. Les résultats obtenus pour différentes valeurs de l'humidité relative sont différenciés. La pente des lignes droites est égale à 1.

Dans le *Tableau V* figurent pour les différentes expériences les données permettant de quantifier l'effet compteur et l'homogénéité de la cellule à empoussièremment. L'effet compteur est le rapport de la concentration mesurée par le compteur 1 sur la concentration géométrique moyenne mesurée par les compteurs 1 et 2. L'homogénéité de la cage correspond au coefficient de variation des concentrations mesurées sur les dif-

férents points de prélèvement de la cellule d'empoussièremment après correction de l'effet compteur. L'effet compteur avec son intervalle de confiance est également illustré sur la *Figure 6*.

Les effets appareils, reproductibilité des appareils, effets appareils par niveau d'humidité relative, effets humidité et concentration sont donnés pour les différents types de fibres dans les *Tableaux VI à X*. Dans ces tableaux pour les effets humidité et concentration les valeurs en caractères gras correspondent à un effet significatif (au seuil de risque de 5 %). L'effet appareil par niveau d'humidité est illustré sur les *Figures 7 et 8* pour le FM-7400 et le Fibrecheck FC-2.

DISCUSSION

Pour comparer les concentrations mesurées par les appareils à lecture directe à celles obtenues par la méthode conventionnelle, il faut disposer dans la cellule à empoussièremment d'un aérosol stable et d'une évaluation aussi fiable que possible de la concentration de référence. Les valeurs indiquées dans le *Tableau V* montrent que le coefficient de variation caractérisant la dispersion des concentrations mesurées sur les trois points de prélèvement est inférieure à 20 % pour l'ensemble des expériences. Les comptages effectués sur les différents filtres de prélèvement l'ont été par un laboratoire accrédité pour ce type d'analyse.

TABLEAU VII

Expérience 2 Fibre de verre

Experiment 2: glass wool fibres

	Niveau du facteur contrôlé	FM-7400				Fibrecheck FC-2			
		Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure
Effet appareil		0,71	0,64	0,78	16	16,92	14,50	19,47	4
Reproductibilité appareil		17,0	8,92	29,3		9,67	2,38	31,5	
Effet appareil par niveau d'humidité	1	0,53	0,44	0,65	4				1
	2	0,82	0,71	0,93	8				2
	3	0,83	0,67	0,99	4				1
Effet humidité	2/1	1,55	1,21	1,93	8/4				2/1
	3/1	1,56	1,16	2,04	4/4				1/1
Effet concentration	2/1	0,97	0,73	1,26	4/4				0/0
	3/1	0,76	0,58	0,99	4/4				0/0
	4/1	0,53	0,40	0,69	4/4				0/4

Valeurs des effets appareils, des effets appareils par niveau d'humidité relative, des effets humidités et concentrations ainsi que de la reproductibilité des appareils (les différents niveaux pour l'humidité et la concentration sont donnés dans le tableau 2, l'explication des différents paramètres mesurés est donnée dans le paragraphe traitement des données).

Pour les effets humidités et concentrations les valeurs en caractères gras correspondent à un effet significatif.

TABLEAU VIII

Expérience 3 Fibres de roche

Experiment 3: rock wool fibres

	Niveau du facteur contrôlé	FM-7400				Fibrecheck FC-2			
		Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure
Effet appareil		0,26	0,20	0,34	16	5,10	3,84	6,83	8
Reproductibilité appareil		55,6	33,6	98,8		35,9	16,7	78,9	
Effet appareil par niveau d'humidité	1	0,10	0,06	0,17	4	6,17	2,75	11,84	1
	2	0,25	0,17	0,36	8	5,12	3,52	7,29	4
	3	0,73	0,42	1,22	4	4,52	2,84	6,72	3
Effet humidité	2/1	2,63	1,29	4,77	8/4	0,95	0,37	1,97	4/1
	3/1	7,53	3,38	15,07	4/4	0,84	0,31	1,76	4/3
Effet concentration	2/1	0,73	0,31	1,43	4/4				1/0
	3/1	0,56	0,24	1,12	4/4				3/0
	4/1	0,64	0,27	1,27	4/4				4/0

Valeurs des effets appareils, des effets appareils par niveau d'humidité relative, des effets humidités et concentrations ainsi que de la reproductibilité des appareils (les différents niveaux pour l'humidité et la concentration sont donnés dans le tableau 2, l'explication des différents paramètres mesurés est donnée dans le paragraphe traitement des données).

Pour les effets humidités et concentrations les valeurs en caractères gras correspondent à un effet significatif.

L'ensemble des filtres a été compté par deux compteurs. Comme on peut le constater sur la *Figure 6* et le *Tableau V*, l'écart moyen entre la concentration mesurée par un compteur et la concentration moyenne n'a jamais dépassé 16 % pour tous les types de fibres.

Les densités de fibres correspondant aux niveaux de concentration moyens donnés dans le *Tableau 4* en prenant en compte les durées de prélèvement correspondant aux différents niveaux de

concentration varient de 49 à 620 fibres/mm², ce qui est très proche des valeurs recommandées dans la norme (50-650 fibres/mm²). Ceci garantit que les comptages des microscopistes varient linéairement lorsque le chargement du filtre augmente.

La distribution en taille des fibres (*cf. Figures 1 à 4*) montre que les fibres générées sont plutôt fines. C'est particulièrement le cas pour le chrysotile puisque la quasi totalité des fibres a un

diamètre inférieur à 0,5 µm. Pour les fibres de verre et de roche les diamètres sont le plus souvent inférieurs à 1 µm. Les fibres de céramique sont plus grossières avec toutefois un diamètre la plupart du temps inférieur à 3 µm.

La connaissance de la distribution en taille des fibres est importante, particulièrement pour ce qui concerne le diamètre. En effet, comme les appareils à lecture directe comptent les fibres quel que soit leur diamètre et

TABLEAU IX

Expérience 4 Fibres de céramique Experiment 4: ceramic fibres

	Niveau du facteur contrôlé	FM-7400				Fibrecheck FC-2			
		Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure
Effet appareil		0,71	0,62	0,81	16	2,30	1,59	3,28	12
Reproductibilité appareil		19,4	4,64	38,8		56,5	27,8	117	
Effet appareil par niveau d'humidité	1	0,68	0,53	0,88	4	2,83	1,39	5,23	3
	2	0,71	0,59	0,85	8	2,36	1,42	3,72	6
	3	0,74	0,56	0,97	4	2,00	0,96	3,61	3
Effet humidité	2/1	1,06	0,76	1,41	8/4	0,93	0,39	1,93	6/3
	3/1	1,11	0,74	1,60	4/4	0,79	0,28	1,78	3/3
Effet concentration	2/1	1,05	0,72	1,48	4/4	1,17	0,48	2,49	4/0
	3/1	1,14	0,78	1,58	4/4	1,11	0,45	2,31	4/0
	4/1	0,75	0,52	1,05	4/4				4/0

Valeurs des effets appareils, des effets appareils par niveau d'humidité relative, des effets humidités et concentrations ainsi que de la reproductibilité des appareils (les différents niveaux pour l'humidité et la concentration sont donnés dans le tableau 2, l'explication des différents paramètres mesurés est donnée dans le paragraphe traitement des données).

TABLEAU X

Expérience 5 Fibres de verre Experiment 5: glass wool fibres

	Niveau du facteur contrôlé	FM-7400				Fibrecheck FC-2			
		Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure	Nombre de mesure
Effet appareil		0,53	0,46	0,61	15	0,43	0,34	0,52	11
Reproductibilité appareil		8,74	2,36	23,3		18,0	2,98	53,4	
Effet appareil par niveau d'humidité	1	0,46	0,34	0,60	3	0,64	0,42	0,92	3
	2	0,67	0,57	0,79	8	0,43	0,31	0,55	6
	3	0,49	0,39	0,61	4	0,29	0,18	0,43	2
Effet humidité	2/1	1,50	1,07	2,06	8/3	0,71	0,41	1,08	6/2
	3/1	1,10	0,75	1,54	4/3	0,49	0,24	0,78	2/2
Effet concentration	2/1	1,04	0,74	1,41	3/4	0,88	0,38	1,46	1/4
	3/1	1,23	0,87	1,65	3/4	1,32	0,84	1,95	1/4
	4/1	1,02	0,70	1,44	3/4	1,44	0,79	2,46	1/2

Valeurs des effets appareils, des effets appareils par niveau d'humidité relative, des effets humidités et concentrations ainsi que de la reproductibilité des appareils (les différents niveaux pour l'humidité et la concentration sont donnés dans le tableau 2, l'explication des différents paramètres mesurés est donnée dans le paragraphe traitement des données).

Pour les effets humidités et concentrations les valeurs en caractères gras correspondent à un effet significatif.

comme la méthode conventionnelle ne prend en compte que les fibres dont le diamètre est inférieur à 3 µm, il est clair que cette distribution de taille crée les conditions optimales pour l'obtention d'un bon accord entre les deux techniques.

Un effet lié à l'humidité relative de l'air a été mis en évidence sur la concentration mesurée par le FM-7400 (cf. Figure 7, Tableaux VII, VIII et X) et un effet lié à la concentration dans la cellule à empoussièrément

(cf. Tableau VII). La tendance est de sous-estimer les concentrations pour une faible humidité relative de l'air (20 %). Si cet effet n'est pas surprenant dans la mesure où le constructeur déconseille d'utiliser l'appareil pour les fibres minérales artificielles quand l'humidité relative de l'air est inférieure à 30 %, il faut souligner qu'il a essentiellement été observé lorsque l'appareil était positionné sur le niveau de sensibilité standard alors qu'il avait été calibré sur le niveau de sensibilité haute. Si l'on exclut les résultats pour lesquels l'appareil était positionné

sur le niveau de sensibilité standard, le rapport entre la concentration mesurée par le FM-7400 (tous niveaux d'humidité confondus) comparé à la méthode conventionnelle varie de 1 à 0,53 (cf. Tableaux VI, IX et X, effet instrument). Le meilleur accord entre les deux techniques est obtenu pour l'aérosol de chrysolite, ce qui est cohérent avec le fait que cet appareil a été calibré sur ce type de fibre. La reproductibilité du FM-7400 est meilleure que 20 % si l'on excepte l'essai sur les fibres de roche pour lequel il était positionné sur la position standard

FIGURE 1

Distribution en longueur et diamètre des fibres de chrysotile générées Length and diameter distribution of the chrysotile generated

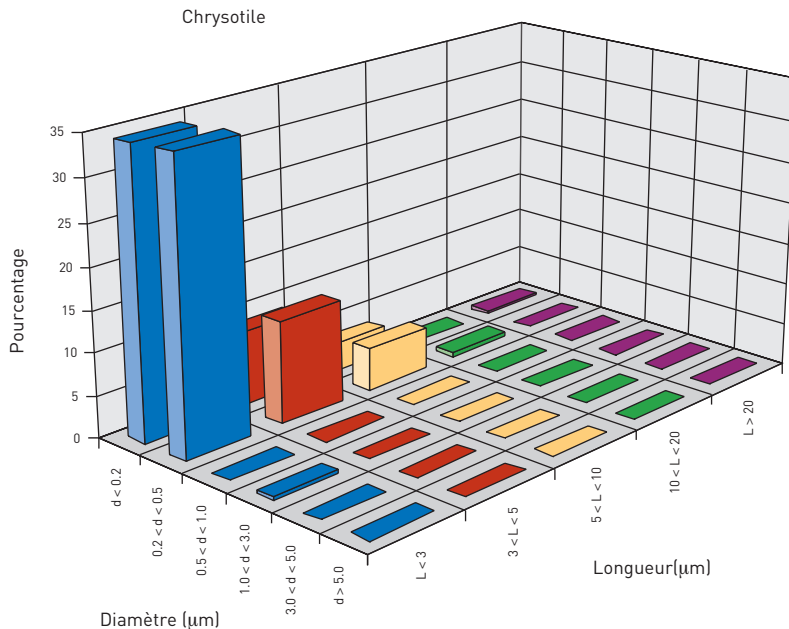
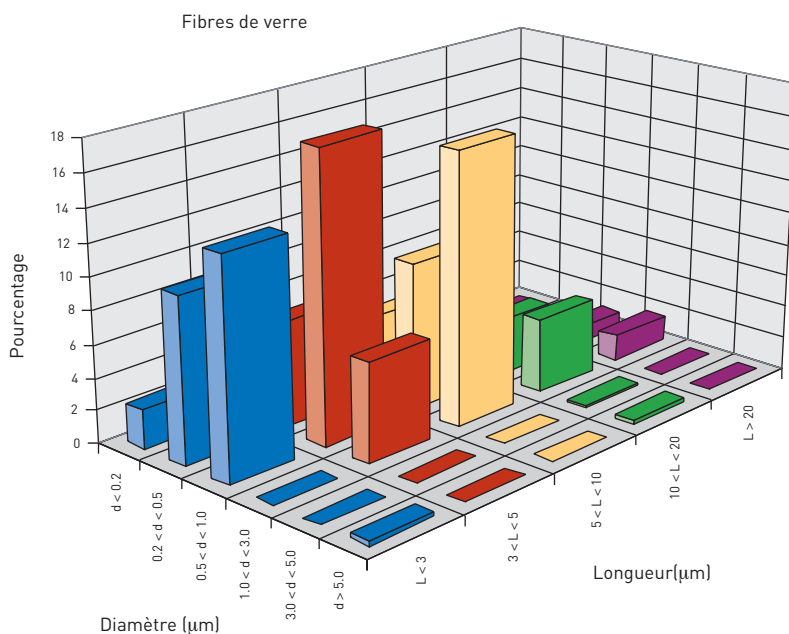


FIGURE 2

Distribution en longueur et diamètre des fibres de verre générées Length and diameter distribution of the glass wool fibres generated



(cf. Tableaux VI, VII, IX et X, reproductibilité de l'appareil).

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de données sur l'utilisation du FM-7400 dans l'industrie des fibres minérales artificielles. En ce qui concerne l'évaluation des fibres d'amiante, un article récent a été publié, (Besson et al., 1999). Il n'apporte malheureusement pas d'éléments de comparaison avec la méthode conventionnelle par microscopie optique à contraste de phase. Il semble que ce soient les versions les plus anciennes FAM-1 et FAM-2 qui ont été le plus étudiées. L'appareil a été testé par comparaison avec des comptages effectués par microscopie optique dans différentes situations, (Droz, 1982). Un accord raisonnable a été trouvé entre les deux méthodes spécialement pour les concentrations élevées. Une autre étude est plus critique. Le jugement est bon pour des comparaisons effectuées au laboratoire, mais plus mesuré pour des études de terrain, (Iles and Shenton-Taylor, 1986). Enfin, certains recommandent l'utilisation du FAM-1 comme méthode de "screening" pour l'évaluation de la concentration en fibres d'amiante, mais excluent qu'il puisse remplacer la méthode conventionnelle du filtre à membrane avec comptage des fibres par microscopie optique à contraste de phase pour des contrôles réglementaires, (Phanprasit et al. 1988).

En ce qui concerne le Fibrecheck FC-2 un seul effet significatif sur la concentration mesurée du niveau d'humidité relative de l'air a été mis en évidence (cf. Tableau X), de même qu'un seul effet lié au niveau de concentration en fibres dans la cellule à empoussièrément (cf. Tableau VI). Si l'on regarde toutefois les résultats présentés sur la Figure 8, on constate que globalement le Fibrecheck FC-2 a tendance à compter moins quand l'humidité relative de l'air augmente. Cet effet est observé pour les fibres minérales artificielles (verre, céramique, roche) que l'appareil soit dans son état modifié ou initial. Le rapport entre la concentration mesurée par l'appareil et celle mesurée par la méthode conventionnelle, tous niveaux d'humidité confondus, s'étend de 0,43 à 16,9 (cf. Tableaux VI à X, effet de l'appareil). Il apparaît ainsi que dans son état modifié (c'est à dire après étalonnage sur un aérosol de chrysotile généré à l'INRS), l'appareil est beaucoup trop sensible (très forte surestimation des concentrations). Si l'on considère uniquement les

FIGURE 3

Distribution en longueur et diamètre des fibres de roche générées
Length and diameter distribution of the rock wool fibres generated

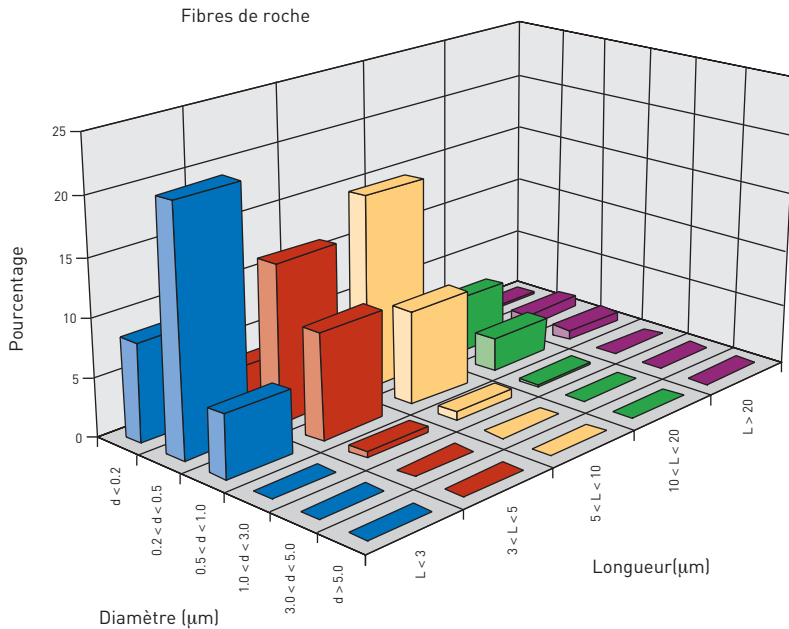
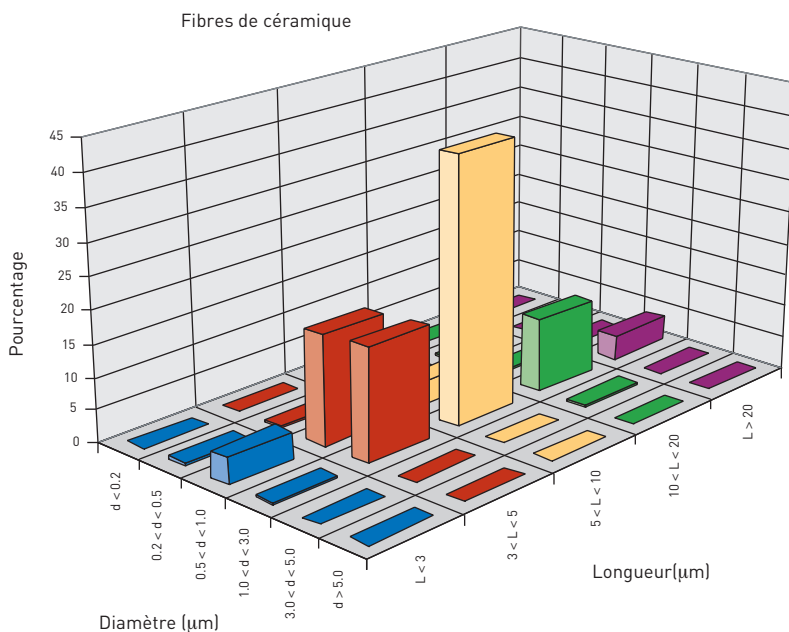


FIGURE 4

Distribution en longueur et diamètre des fibres de céramiques générées
Length and diameter distribution of the ceramic fibres generated



résultats obtenus avec l'appareil dans l'état où il est normalement étalonné les écarts sont moins importants. On constate toutefois des résultats contrastés en fonction du type de fibres (comptage 2,3 fois trop élevés pour les fibres de céramique et 2,3 fois moins élevés pour les fibres de verre). Ici encore, les résultats les meilleurs ont été obtenus sur l'aérosol de chrysotile, sur lequel, il est vrai, l'appareil a été étalonné. En ce qui concerne la reproductibilité, les valeurs pour le Fibrecheck FC-2 varient de 9,7 à 56,5 (cf. *Tableau VI* à *X*, reproductibilité de l'appareil).

Si l'on considère les résultats obtenus par l'appareil dans son état initial (cf. *Tableau IV*, expériences 4 et 5), on constate qu'il n'a pas été en mesure d'estimer la concentration en nombre de fibres dans trois cas où les concentrations mesurées par la méthode conventionnelle étaient supérieures à 4 fibres/cm³ (cf. *Tableau IV* : lignes 8, 13 et 15, expérience 4). Ceci est cohérent avec le domaine d'utilisation annoncé de l'appareil qui s'étend de 0 à 5 fibres/mL. Il est par contre plus surprenant de voir l'appareil rendre un résultat (1,4 fibres/mL) pour une concentration mesurée par la méthode conventionnelle de 8,2 fibres/mL (*Tableau IV* : ligne 1, expérience 5). Dans ce cas, en effet, l'utilisateur ne sait pas qu'il est en dehors du domaine d'utilisation du Fibrecheck FC-2. L'examen des données du *Tableau IV* montre également qu'il semble exister dans certains cas une limite en dessous de laquelle l'appareil rend des résultats forts éloignés de la concentration réelle (*Tableau IV*, lignes 2, 6 et 9, expérience 5).

D'autres essais ont été publiés montrant une corrélation positive ($r = 0,68$) entre les mesures du Fibrecheck-FC2 et la méthode du filtre à membrane, (Independent Environmental Services, 1994). Il s'agit de données de terrain dont la particularité est de concerner des situations de faibles pollutions. Quarante quatre pour cent des données étaient inférieures à la limite de détection de la microscopie optique à contraste de phase (0,01 fibre/mL), 2 concentrations seulement sur 255 étant supérieures à 0,1 fibre/mL. Ceci constitue une limite importante du test, soulignée d'ailleurs par les auteurs. Pour évaluer correctement l'aptitude de l'appareil à mesurer une concentration en nombre de fibres, il est sûrement nécessaire d'avoir des fibres à mesurer.

FIGURE 5

Concentrations mesurées par les deux appareils à lecture directe, pour toutes les fibres étudiées, en fonction des concentrations mesurées par la méthode conventionnelle. Les résultats obtenus pour des humidités relatives différentes sont repérés. La pente de la droite est égale à un

Concentrations measured by the two direct-reading instruments, for all the fibres tested, compared with the concentrations measured by the conventional method. The results obtained at different relative humidities are distinguished. The slope of the straight line is equal to one

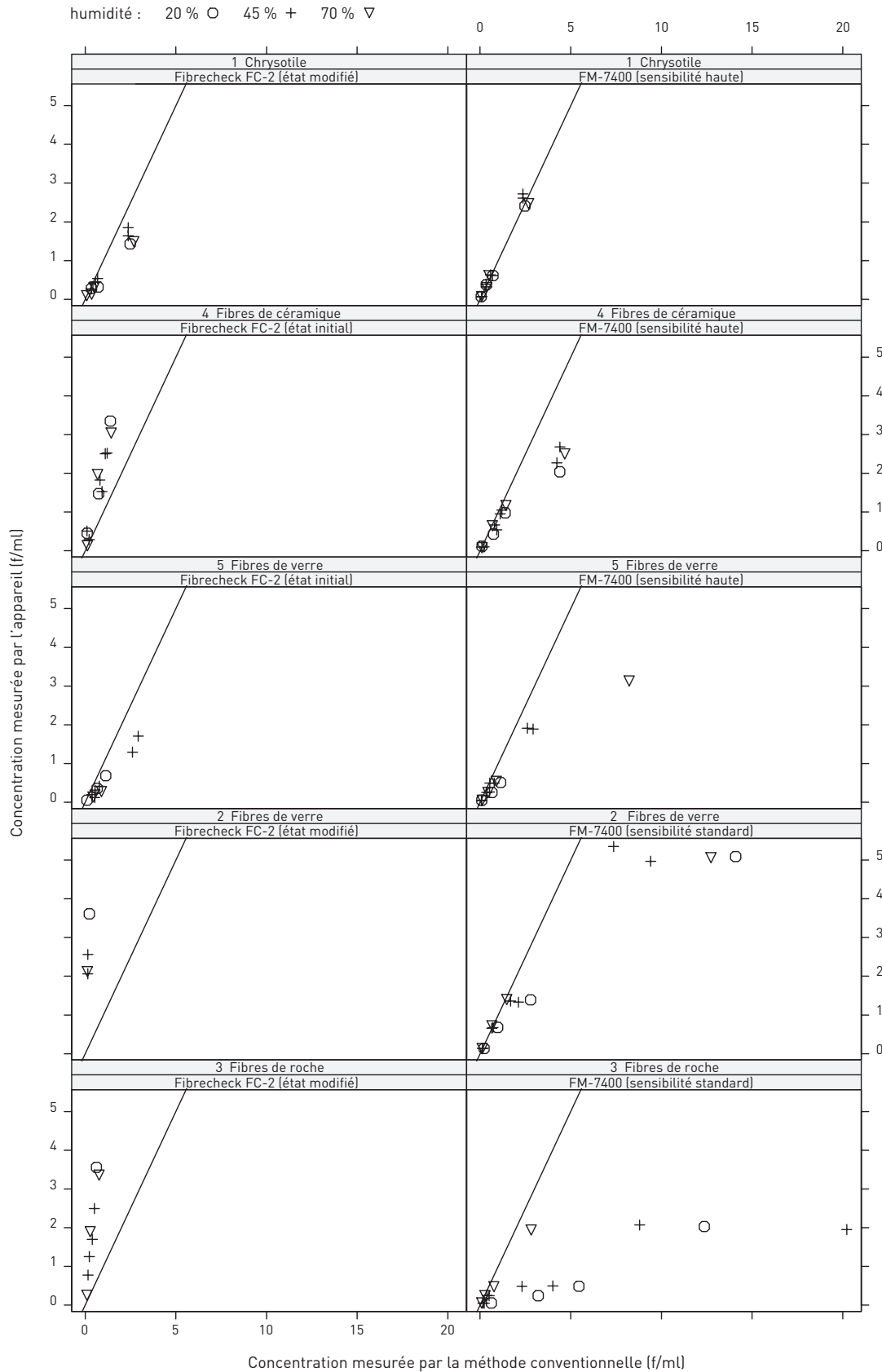


FIGURE 6

Rapport entre la concentration mesurée par le compteur 1 et la concentration géométrique moyenne mesurée par les compteurs 1 et 2 pour les cinq expériences. La barre verticale rouge représente l'intervalle de confiance
Ratio of the concentration measured by counter 1 to the mean geometric concentration measured by counters 1 and 2 for the five experiments. The vertical bar represents the confidence interval

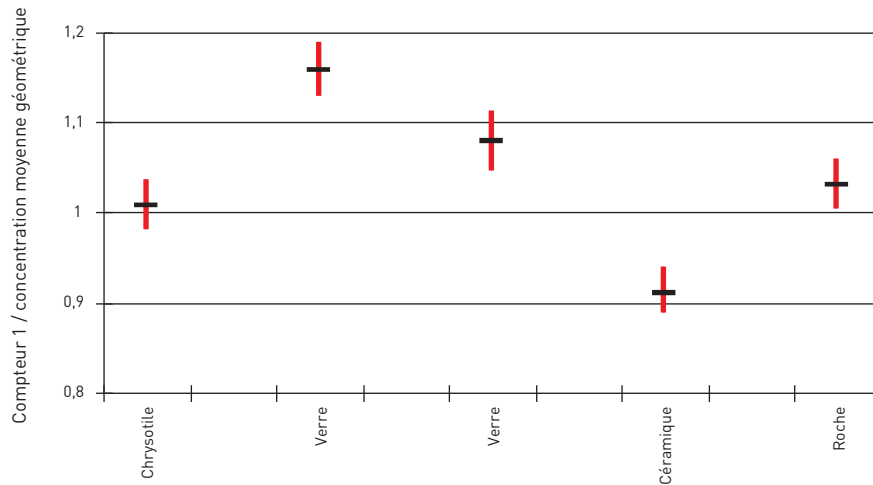


FIGURE 7

Concentration mesurée par le FM-7400 sur la concentration de référence pour les cinq expériences par niveau d'humidité. La barre verticale rouge représente l'intervalle de confiance. La lettre H ou S précise que l'appareil était réglé en sensibilité haute ou standard. L'échelle sur l'axe vertical est logarithmique
Concentration measured by the FM-7400 per humidity level at the reference concentration for the five experiments. The vertical bar represents the confidence interval. The letter H or S indicates that the instrument was set to high or standard sensitivity. The scale on the vertical axis is logarithmic

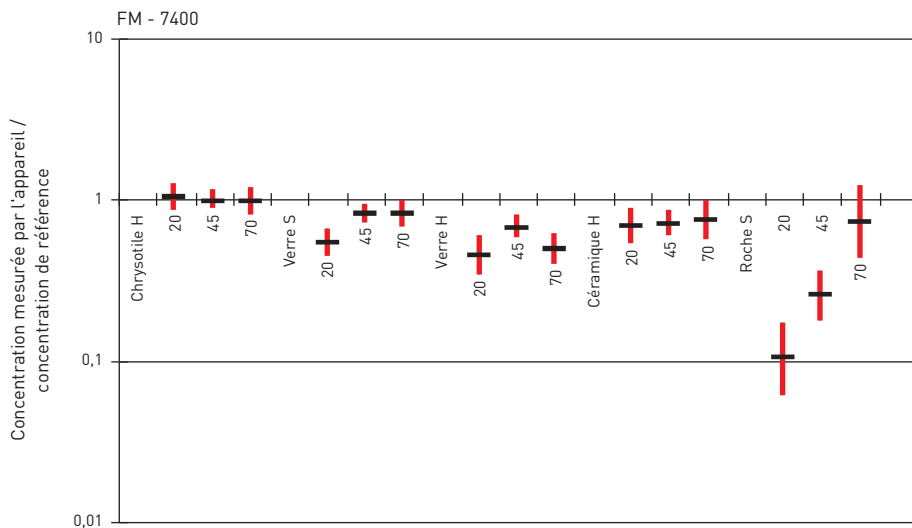
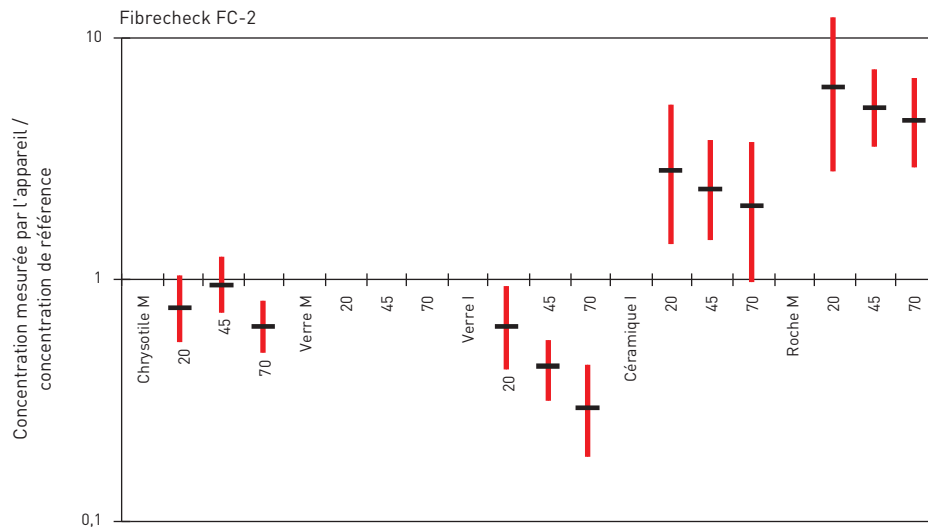


FIGURE 8

Concentration mesurées par le Fibrecheck FC-2 sur la concentration de référence pour les cinq expériences par niveau d'humidité. La barre verticale rouge représente l'intervalle de confiance. La lettre M ou I précise que l'appareil était dans son état modifié ou initial. L'échelle sur l'axe vertical est logarithmique

Concentration measured by the Fibrecheck FC-2 per humidity level at the reference concentration for the five experiments. The vertical bar represents the confidence interval. The letter M or I indicates that the instrument was in its modified or initial state. The scale on the vertical axis is logarithmic



CONCLUSION

De cette étude il ressort que le FM-7400 est l'appareil le plus polyvalent pour ce qui concerne la nature des fibres. Quand il est réglé sur la sensibilité sur laquelle il a été calibré, le rapport entre la concentration mesurée par l'appareil et la concentration obtenue par la méthode conventionnelle varie dans le domaine (0,5 - 1) pour les différents types de fibres étudiées (chrysotile, fibres de verre ou céramique). Le point faible de l'appareil est qu'il peut changer de sensibilité sans raison apparente. Lors de chaque utilisation il faut vérifier que l'appareil est bien réglé sur le niveau de sensibilité sur lequel il a été calibré. De même le certificat de calibrage fourni par le constructeur doit impérativement indiquer la sensibilité choisie.

Le Fibrecheck FC-2 est un appareil nettement moins polyvalent. Sur la base d'un étalonnage permettant une détection correcte des fibres d'amiante, il surestime de manière très importante la concentration en fibres minérales artificielles. Dans l'état où il est normalement calibré un aérosol fin de chrysotile n'est pas détecté. Pour les fibres minérales artificielles sa réponse dépend fortement de la nature des fibres. Il semble manquer de sensibilité aux faibles concentrations et il n'est pas toujours évident pour l'utilisateur de se rendre compte que l'on sort du domaine d'utilisation conseillé.

Ces appareils nécessitent d'être calibrés et vérifiés sur le type de fibres que l'on souhaite étudier. Malheureusement cette opération n'est pas toujours accessible à l'utilisateur et nécessitera le concours d'un laboratoire spécialisé, le

constructeur lui-même n'étant pas toujours en mesure de réaliser cette opération. En l'état actuel l'évaluation de la concentration en fibres dans des atmosphères ou plusieurs variétés de fibres peuvent coexister pose problème, quel que soit l'appareil envisagé.

Remerciements :

Les auteurs remercient Nathalie Carabin, Simone Lima, Marie-Cécile Starck pour leur participation à la réalisation de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AFNOR. (1991) Détermination de la concentration en nombre de fibres par microscopie optique en contraste de phase. Méthode du filtre à membrane. Standard X43-269. Paris-La-Défense : Association française de normalisation.
- [2] BARON PA. (1993) Measurement of asbestos and other fibers. In Willeke K, Baron, PA, editors. Aerosol measurement-principles-techniques and applications. New York : Van Nostrand Reinhold.
- [3] BARON PA. (1994) Direct-reading instruments for aerosols. A review. *Analyst* ; 119 : 35-40.
- [4] BESSON P, LALANNE FX, WANG Y, GUYOT F. (1999) Multi-parameter observation of environmental asbestos pollution at the Institut de Physique du Globe de Paris (Jussieu Campus, France). *Ann. Occup. Hyg* ; 43 : 527-41.
- [5] CLUFF DL, PATITSAS AJ. (1992) Size characterisation of asbestos fibers by means of electrostatic alignment and light-scattering techniques. *Aerosol Sci Technol* ; 17 : 186-98.
- [6] DROZ PO. (1982) Some field experience with a fibrous aerosol monitor. In Proceedings of the fourth international colloquium on dust measuring technique and strategy, Edinburgh, 20-23 September. pp. 199-208.
- [7] DU TOIT RJJ. (1982) Vickers M.88 Versus Manual Count. In Proceedings of the fourth international colloquium on dust measuring technique and strategy, Edinburgh, 20-23 September. pp. 133-42.
- [8] GÖRNER P, FABRIÈS JF. (1990) Techniques de mesure automatique des aérosols atmosphériques. *Cah Notes Doc* ; 140 : 595-626.
- [9] ILES PJ, SHENTON-TAYLOR T. (1986) Comparison of a fibrous aerosol monitor (FAM) with the membrane filter method for measuring asbestos concentrations. *Ann Occup Hyg* ; 30 : 77-87.
- [10] Independent Environmental Services. (1994) Table of results from the « fibrecheck » field-trials carried out to compare its performance to that of the accepted method for determining airborne asbestos fibre concentration. Cramlington, UK : Independent Environmental Services.
- [11] JONES AD, GALE RW. (1982) Industrial trials with the Vickers M88 rapid asbestos fibre counter. *Ann Occup Hyg* ; 25 : 39-51.
- [12] KAUFFER E, VIGNERON JC, VILLA M, MARTIN P, GRZEBYK M (2000) Mesurage de la concentration en nombre de fibres dans l'air. Etude comparée de la méthode du filtre à membrane et des appareils à lecture directe. Résultats préliminaires. *Cah Notes Doc Hyg Sécur Travail* ; 178 : 55-63. (Also published in *Gefahrstoffe Reinhaltung Luft*, 2001 ; 61, after translation into German.)
- [13] KERKER M, MATIJEVIC E (1961) Scattering of electromagnetic waves from concentric infinite cylinders. *J Opt Soc Am* ; 51 : 506.
- [14] LILIENFELD P. (1987) Light scattering from oscillating fibers at normal incidence. *J Aerosol Sci* ; 18 : 389-400.
- [15] LILIENFELD P, ELTERMAN PB, BARON P. (1979) Development of a prototype fibrous aerosol monitor. *Am Ind Hyg Assoc J* ; 40 : 270-83.
- [16] MIE G. (1908) A contribution to the optics of turbid media, especially colloidal metallic suspensions. *Ann Phys* ; 25 : 377-445.
- [17] PHANPRASIT W, ROSE VE, OESTENSTAD RK. (1988) Comparison of the fibrous aerosol monitor and the optical fiber count technique for asbestos measurement. *Appl Ind Hyg* ; 3 : 28-33.
- [18] PRODI V, DE ZAIACOMO T, HOCHRAINER D, SPURNY K. (1982) Fibre collection and measurement with the inertial spectrometer. *J Aerosol Sci* ; 13 : 49-58.
- [19] RIHN B, KAUFFER E, MARTIN P, COULAIS C, VILLA M, BOTTIN MC, VIGNERON JC, EDORTH A, MARTINET N. (1996) Short-term crocidolite inhalation studies in mice : validation of an inhalation chamber. *Toxicology* ; 109 : 147-56.
- [20] ROOD AP, WALKER EJ, MOORE D. (1992) Construction of a portable fiber monitor measuring the differential light scattering from aligned fibers. *Aerosol Sci Technol* ; 17 : 1-8.
- [21] SCHNEIDER T, HOLST E. (1983) – Man-made mineral fibre size distribution utilizing unbiased and fibre length biased counting methods and the bivariate log-normal distribution. *J Aerosol Sci* ; 14 : 139.
- [22] SPIEGELHALTER DJ, THOMAS A, BEST NG, GILKS WR., (1996) BUGS : Bayesian inference using Gibbs sampling, version 0.5 (version ii). Cambridge : MRC Biostatistics Unit.
- [23] TIMBRELL V. (1975) Alignment of respirable asbestos fibres by magnetic fields. *Ann Occup Hyg* ; 18 : 299-311.
- [24] WHO. (1985). Reference methods for measuring airborne man – made mineral fibres, Environmental Health N° 4. Copenhagen ; World Health Organization.