
2

Métrologie des fibres dans l'air Production, utilisation Environnement

Introduction	57
Méthodes utilisées pour la métrologie des fibres dans l'air	58
Méthodes de prélèvements des filtrages d'air	58
Méthodes de quantification et de mesure des fibres	60
Facteurs méthodologiques influençant les résultats	61
Rétention de fibres sur les cylindres protecteurs	61
Influence des méthodes analytiques	62
Influence de la méthode de référence et des critères utilisés pour définir une fibre	64
Conclusion	65
Expression des concentrations	66
Données métrologiques	67
Production	67
Niveaux d'exposition actuels	67
Données historiques et reconstitution	72
Utilisateurs	75
Population générale et environnement	85
Bâtiments publics	85
Bâtiments privés	85
Environnement urbain	85
Environnement rural	87
Conclusion	87
Mesures gravimétriques	87

Références 91

Annexes 97

Dépôt des particules et des fibres inhalées dans les voies respiratoires ... 97

Exposition à la wollastonite 98

Introduction

L'analyse des prélèvements d'air doit fournir une estimation aussi exacte et fiable que possible de la concentration et de la distribution granulométrique des fibres présentes dans différents types d'atmosphères : lieu de travail, environnement intérieur ou général. Les données obtenues doivent pouvoir être comparées d'une étude à l'autre. La description des méthodes de prélèvements et des techniques de préparation et de comptage mises en œuvre doit permettre d'appréhender les étapes au cours desquelles des biais de mesure sont susceptibles de se produire.

La méthodologie utilisée pour mesurer les concentrations en fibres de substitution dans l'air est largement inspirée de celle utilisée pour l'amiante. Le type de matériel et les conditions de prélèvement (type de filtre, débit de la pompe, etc), la préparation des échantillons (méthode directe vs indirecte), le type de microscope, les règles de comptage et la densité de fibres sur le filtre sont susceptibles d'influencer les résultats (Sheehan *et al.* 1992). Des pertes de fibres lors de la préparation peuvent biaiser, à la fois, la concentration et l'aspect de la distribution granulométrique des fibres (Kauffer *et al.* 1993 ; Sahle & Lazlo 1996). Il faut donc veiller à utiliser des techniques aussi reproductibles et représentatives que possible. Les premiers prélèvements d'air avec comptage de fibres s'adressant spécifiquement à des fibres vitreuses synthétiques datent des années 1970 (Konzen 1974 ; Corn & Sansone 1974 ; Corn *et al.* 1976 ; Esmen *et al.* 1978 ; Head & Wagg 1980).

En dehors de la surveillance des milieux de travail ces mesures sont d'une importance capitale pour l'interprétation des données fournies par les études épidémiologiques, des biais systématiques dans les mesures pouvant conduire à une sous- ou une sur-estimation des risques liés à l'exposition aux fibres artificielles. D'autre part elles sont l'un des éléments pris en compte pour l'adoption des seuils réglementaires utilisés en hygiène du travail.

Ce chapitre consiste en une synthèse des données disponibles sur les méthodes de prélèvement d'air, les méthodes de mesure, les facteurs influençant la libération des fibres dans l'air et les concentrations en fibres dans l'air. En dehors des fibres habituellement regroupées sous les vocables « fibres minérales artificielles » (FMA) ou « fibres vitreuses synthétiques » (FVS), il existe très peu de données concernant les concentrations dans l'air pour les autres fibres de substitution (para-aramide, cellulose, polyvinylalcool, wollastonite). Ces données ne seront pas traitées dans ce chapitre. Une annexe est consacrée aux mécanismes de dépôt pulmonaire des particules inhalées.

Méthodes utilisées pour la métrologie des fibres dans l'air

Différents protocoles de prélèvements et d'analyses sont disponibles pour mesurer la concentration en fibres dans l'atmosphère, cependant très peu sont spécifiques des fibres synthétiques. La plupart sont dérivés des méthodes employées pour contrôler les expositions à l'amiante.

En 1985, une méthode de référence, spécifiquement dédiée à la mesure de la concentration et de la distribution granulométrique des fibres synthétiques en milieu professionnel, est adoptée en Europe (WHO 1985). La méthode de référence NIOSH 7400 utilisée aux États-Unis n'est pas spécifique des FVS.

Notons que, conjointement à la détermination de la concentration en fibres dans l'air, il est également possible de déterminer les concentrations pondérales en poussières totales et/ou respirables (voir p. 87).

Méthodes de prélèvements des filtrages d'air

Des stratégies d'échantillonnage bien conçues doivent donc prendre en compte les considérations sur « comment, où, quand, pour combien de temps » échantillonner ainsi que sur le nombre d'échantillons à prélever pour s'assurer que les résultats seront comparables. La stratégie d'échantillonnage devra être adaptée en fonction du but poursuivi, par exemple épidémiologie, hygiène du travail... (ICPS 1988, p. 30).

Il faut distinguer les méthodes utilisées pour contrôler les expositions de type hygiène du travail de celles permettant de mesurer les taux de fibres et les niveaux d'empoussièrage de l'air ambiant à l'intérieur des bâtiments ou dans l'environnement général extérieur.

En ce qui concerne les méthodes de type hygiène du travail, la méthode de prélèvement est basée sur le principe de l'aspiration de l'air au travers d'une membrane filtrante en ester ou nitrate de cellulose, de porosité inférieure à 1,2 μm , sous un débit généralement faible (0,5 à 2 l/min). L'évaluation des expositions individuelles est réalisée par des prélèvements personnels qui nécessitent l'utilisation d'une pompe portative avec un porte-filtre dirigé vers le bas et placé dans la zone des voies respiratoires supérieures. Les prélèvements statiques qui permettent de mesurer la concentration en fibres dans l'atmosphère générale des lieux de travail et dans l'environnement peuvent être réalisés à un débit supérieur.

Les caractéristiques des méthodes nationales, européennes et internationales actuellement en usage sont synthétisées dans le tableau 2-1.

Tableau 2-1 Méthodes de prélèvement

Référence	WHO - 1985		NIOSH 7400 - 1989	HSE - MDHS 39/3 - 1990	ISO/DIS - 8672 - 1988	AFNOR x 43.269 - 1991	VDI - 3492 - 1994	WHO - 1997
Champs d'application	FVS (Europe)		Amiante (USA)	Amiante (UK)	Toutes fibres inorganiques	Toutes fibres inorganiques (France)	Toutes fibres inorganiques (Allemagne)	Toutes fibres inorganiques (Europe)
Type filtre	Ester de cellulose quadrillée	Polycarbonate ou Gelman DM 800	Ester de cellulose	Ester de cellulose	Ester ou nitrate de cellulose	Ester de cellulose quadrillé ou nitrate de cellulose	Polycarbonate prémétallisé à l'or	Ester ou nitrate de cellulose
Tête de prélèvement	Cylindre	Cylindre	Cylindre	Cylindre	Cylindre	Cylindre (uniquement si contact direct avec le matériau)	Cylindre	Cylindre
Diamètre filtre (mm)	25	25	25	< 20	25	25	25 à 50	25
Diamètre pore (µm)	1,2	≤ 0,8	0,45 à 1,2	?	≤ 1,2	≤ 1,2	0,8	0,8 à 1,2
Débit (l/min)	0,5 à 2	1	0,5 à 16	1 à 4	1	0,5 à 2	2	0,5 à 16
Statique	(x)	(x)	(x)	x	x	x	(x)	(x)
Individuelle	x	x	x	x	x	x	x	
C numériques	x		x	x	x	x	x	
Distribution des tailles		x						

Autres méthodes :

WHO - 1981 : *Conc. pondérale* : échantillonnage sur filtre en fibre de verre ou ester de cellulose - pore : 0,6µ à 1,5 - *pesée*

AFNOR NFX 43 050 - 1996 : Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission.

Méthodes de quantification et de mesure des fibres

Le tableau 2-2 synthétise les caractéristiques des fibres accessibles par les différentes méthodes analytiques.

La méthode analytique la plus utilisée pour déterminer la concentration en fibres synthétiques dans l'air est la méthode du filtre membrane examiné en *microscopie optique à contraste de phase (MOCP)*, méthode employée en hygiène du travail dès 1977 pour contrôler les concentrations en fibres d'amiante. Elle est uniquement basée sur un critère morphologique et n'est pas spécifique, une fibre dénombrable étant définie comme toute structure ayant une longueur (L) supérieure à 5 µm, un diamètre (Ø) inférieur à 3 µm et un rapport L/Ø supérieur à 3/1 (voir Glossaire). La nature de la fibre n'est pas déterminée. De plus, la résolution du microscope optique limite l'observation à des fibres d'un diamètre supérieur à 0,25 µm. Les fibres les plus fines et les

Tableau 2-2 Méthodes d'analyse

Méthode	Type d'information	Grossissement d'analyse	Identification	Diamètre minimum mesurable (µm)	Critères comptage fibres respirables (µm)
Microscopie optique en contraste de phase (MOCP)	Concentration numérique	x 400	morphologie	0,2	WHO, ISO, AFNOR : L/D ≥ 3, D ≤ 3, L ≥ 5 NIOSH : • Méthode A : L/D ≥ 3, D ≤ 3, L ≥ 5 • Méthode B : L/D ≥ 5, D ≤ 3, L ≥ 5
Microscopie optique à lumière polarisée (MOLP)	Critères optiques	x 100	• morphologie • isotropie ou non • indice de réfraction	0,5	L/D ≥ 3
Microscopie électronique à balayage (MEB)	Concentration numérique taille type	x 2 000-2 500	• morphologie • chimie par spectrométrie dispersive en énergie de rayons X (SDEX)	0,13-0,17 0,07 (photo)	VDI : L/D > 3, 0,2 ≤ D ≤ 3, 5 ≤ L ≤ 100 Bords // dans le sens de la longueur
Microscopie électronique à transmission (MET)	Concentration numérique taille type	x 10 000-30 000	• morphologie • cristallographie • chimie par SDEX	Tout diamètre de fibres*	X 43.050 : L/D ≥ 3, D ≤ 3, L ≥ 0,5

plus courtes ne sont donc pas prises en compte lors des comptages MOCP. En dépit de ces restrictions, la MOCP reste l'outil le plus adéquat pour mesurer rapidement et à faible coût les concentrations en fibres dans l'air.

Des méthodes d'analyse plus spécifiques existent :

La microscopie optique en lumière polarisée (MOLP) permet l'identification partielle des fibres sur la base de leurs caractères optiques (anisotropie, indice de réfraction). En pratique, l'utilisation de cette technique est limitée à des fibres de diamètre supérieur à 0,5 μm (McCrone 1980).

La microscopie électronique à balayage (MEB), couplée avec un *spectromètre de rayons X en dispersion d'énergie*, permet d'identifier les fibres sur la base de leur aspect morphologique et de leur composition chimique élémentaire. Le diamètre minimum des fibres mesurables en routine par examen direct de l'écran du microscope est de l'ordre de 0,15 μm . Des protocoles analytiques plus sophistiqués dans lesquels les fibres sont repérées et mesurées sur photographies, permettent de réduire cette limite à 0,07 μm (Kauffer *et al.* 1993). L'utilisation du MEB est imposée dans la méthode de référence du WHO pour la détermination de la distribution granulométrique des fibres dans les filtrages d'air. Si nécessaire, elle peut aussi être utilisée pour déterminer des concentrations en fibres dans l'air (Crawford *et al.* 1987). La méthode de référence allemande VDI 3492 est également basée sur l'utilisation du MEB. Bien que principalement dédiée à la mesure de la concentration en fibres d'amiante dans l'air lors de travaux de rénovation, démolition ou maintenance, cette méthode peut être adaptée à la mesure des concentrations de FVS.

La microscopie électronique à transmission (MET) couplée avec un *spectromètre de rayons X en dispersion d'énergie* est la méthode la plus sensible. La résolution du MET ($\approx 0,0002 \mu\text{m}$) permet de visualiser en routine des objets de diamètre inférieur à 0,01 μm . Les fibres de l'ensemble de la distribution granulométrique peuvent être prises en considération. Les fibres sont identifiées sur la base de leur aspect morphologique, de leur structure cristallographique (microdiffraction électronique) et de leur composition chimique élémentaire.

Facteurs méthodologiques influençant les résultats

Les facteurs méthodologiques ayant une influence sur les résultats des mesures de concentration en fibres dans l'air sont liés, soit à la méthode de prélèvement, soit à la méthode de comptage.

Rétention de fibres sur les cylindres protecteurs

Parmi les facteurs liés à la méthode de prélèvement, le facteur le plus influent est l'utilisation d'un cylindre protecteur au niveau de la tête de prélèvement. Il est utilisé pour éviter un contact direct de la surface du filtre avec les

produits manipulés. Son utilisation peut modifier le résultat de façon importante, en raison des dépôts très variables sur les parois de ce cylindre. Plusieurs auteurs ont souligné cette variabilité. Breysse *et al.* (1990) décrivent une procédure de récolte des fibres déposées sur les parois par rinçage du cylindre. Pour des fibres céramiques réfractaires, Cornett *et al.* (1989) donnent une valeur moyenne de dépôt de fibres sur le cylindre de 16,5 % (0,2-58 %). Des échantillons prélevés lors du soufflage de laines d'isolation montrent un pourcentage de dépôt sur le cylindre de 31 % (7-77 %) avec des filtres en polycarbonate et de 17 % (6-37 %) avec des filtres en polymères de chlorure de polyvinyle et d'acrylonitrile. La charge en fibres retrouvée sur les cylindres n'est pas liée de manière prévisible à la charge en fibres des filtres (Robbins *et al.* 1992). Lors de mesures réalisées sur des installateurs d'isolants à base de FVS, Lees *et al.* (1993) montrent une augmentation du niveau d'exposition de 65 % en moyenne si les fibres déposées sur les parois du cylindre sont prises en compte. Toutes les études citées ci-dessus se réfèrent à des mesures réalisées aux États-Unis. Cherrie et Johnston (1993) attribuent ce dépôt sur les parois des cylindres à la présence de charges électrostatiques au niveau des filtres et suggèrent un pré-traitement des filtres visant à les éliminer. Ils indiquent que ce pré-traitement a été réalisé lors des études originales sur les concentrations en fibres dans l'industrie de production des FVS en Europe.

Par ailleurs, le dépôt de fibres sur les parois du cylindre protecteur peut biaiser la distribution granulométrique observée. En général, les fibres déposées sur les parois sont plus longues et plus grosses que celles déposées sur le filtre (Robbins *et al.* 1992).

La norme française X43 269 préconise l'utilisation du cylindre protecteur uniquement dans les cas de contact direct avec le matériau contenant les fibres.

Influence des méthodes analytiques

Il ressort de la description des méthodes analytiques (voir p. 60) que le type d'appareillage utilisé influence de façon évidente les résultats de comptage, une influence liée aux différences de résolution des différents types de microscopes. Il existe des différences plus ou moins marquées dans la distribution granulométrique des fibres en suspension dans l'air pour les différents types de FVS. En fonction du spectre granulométrique des fibres présentes dans l'aérosol, des variations de résultats plus ou moins importantes sont attendues selon la méthode utilisée.

Le pourcentage de fibres qui ne sont pas détectées par la MOCP (par rapport aux mesures réalisées en MET) sera fonction du contenu en fibres fines ($\varnothing < 0,25 \mu\text{m}$) et courtes ($L < 5 \mu\text{m}$) dans l'aérosol. Pour les laines minérales d'isolation courantes (laine de verre de roche ou de laitier), ce pourcentage est généralement très faible. Notons cependant que, lors de l'installation d'un type de panneaux de laine de verre fine (diamètre médian : $0,47 \mu\text{m}$) utilisés

pour l'isolation de combles, Jaffrey (1990) observe que 30 % des fibres présentes dans l'aérosol ont un diamètre inférieur à 0,2 μm . Pour les fibres céramiques (diamètre médian : 0,5 à 1,0 μm), on peut espérer détecter de 80 à 90 % des fibres lors des contrôles de routine en MOCP (Rood 1988). Pour les fibres de verre superfines (diamètre médian : 0,1 à 0,3 μm) utilisées pour des isolations à haute performance (aéronautique) ou pour la fabrication de papiers à base de fibres de verre, 13 à 51 % des fibres dans l'aérosol ont un diamètre inférieur à 0,2 μm et une longueur supérieure à 5 μm et ne seront donc pas détectées en MOCP (Rood & Streeter 1985).

Il est intéressant de comparer ces données à celles disponibles pour l'amiante. Gibbs et Hwang (1982) ont mesuré par MET la distribution granulométrique de fibres d'amosite, de crocidolite et de chrysotile présentes dans l'air de mines et d'unités d'ensachage. Le calcul à partir des données originales montre qu'en moyenne, 73,6 % des fibres d'amosite, 17,9 % des fibres de crocidolite et 50 % des fibres de chrysotile plus longues que 5 μm ont un diamètre supérieur à 0,25 μm et sont donc potentiellement dénombrables en MOCP. Ces fibres représentent respectivement 13,1 %, 1,0 % et 1,3 % de la concentration totale mesurée par MET.

Ceci implique qu'en fonction de la distribution granulométrique des fibres dans l'air, une même concentration en fibres rapportée à partir des mesures en MOCP représente des concentrations variables en fibres totales et en fibres plus longues que 5 μm .

La figure 2-1 représente une modélisation théorique de l'influence du diamètre moyen et de la distribution des diamètres des fibres dans l'air sur le pourcentage de fibres détectées par MOCP ($D \leq 0,25 \mu\text{m}$) et MEB ($D \leq 0,15 \mu\text{m}$). Le modèle est basé sur une distribution log-normale avec une déviation standard géométrique de 2,10. Les pourcentages de fibres de diamètre inférieur ou égal à 0,15 et 0,25 μm ont été calculés pour des distributions ayant un diamètre moyen géométrique de 0,1, 0,2, 0,5 et 1 μm . Notons que ces diamètres moyens ont été choisis pour se rapprocher de ceux couramment observés dans l'air pour la crocidolite (0,1 μm), les microfibrilles de verre (0,2 μm), les fibres céramiques réfractaires (0,5 μm) et les laines d'isolation (1 μm).

Enfin, Kauffer *et al.* (1993) rapportent que le comptage et la mesure des fibres directement sur l'écran du MEB conduisent à une sous-estimation des concentrations et une sur-estimation des diamètres moyens par rapport au travail sur photo. Le travail sur l'écran du MEB a l'avantage de permettre l'analyse de la composition chimique de chaque fibre, ce qui n'est pas possible pour le travail sur photo.

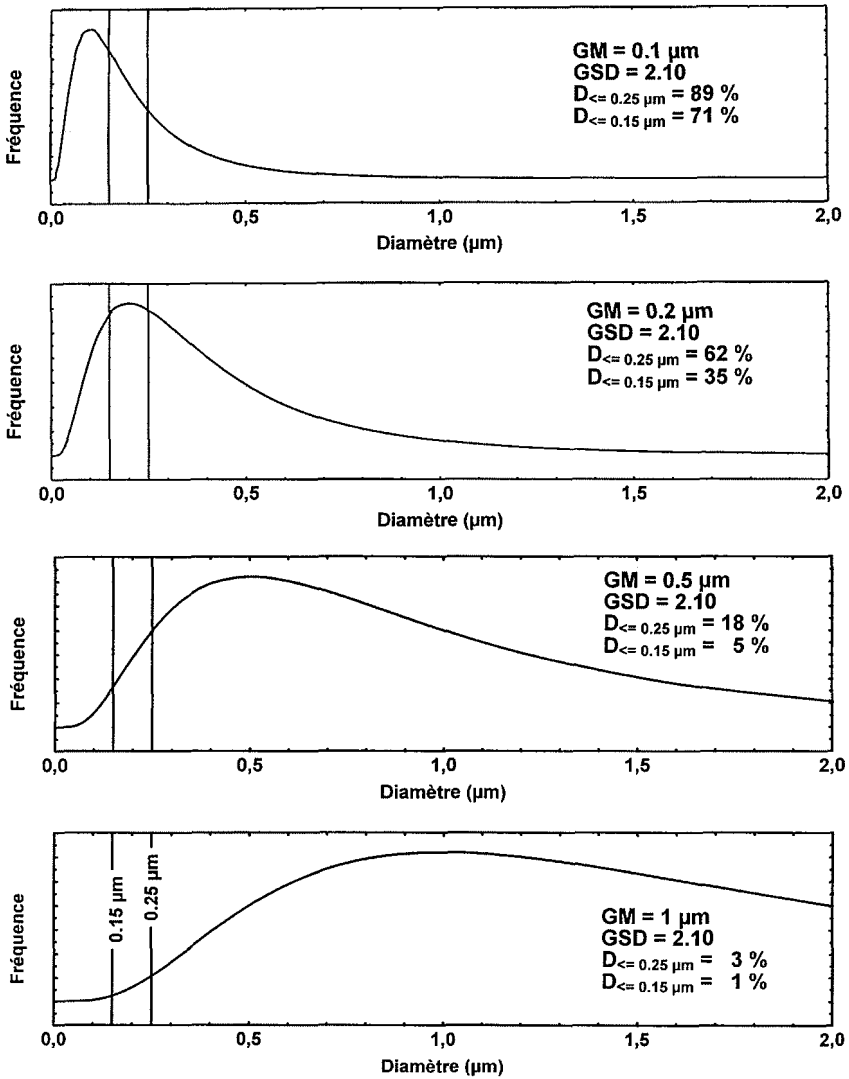


Fig. 2-1 Influence du diamètre moyen et de la distribution des diamètres sur le pourcentage de fibres visualisées en MOCP et en MEB. Modèle théorique (voir p. 63)

Influence de la méthode de référence et des critères utilisés pour définir une fibre

Crawford *et al.* (1987) montrent que l'utilisation de méthodes de comptage standardisées et de circuits de comparaison réduit les variations intra- et inter-laboratoires sur les résultats de comptage de FVS dans les filtrages d'air.

Pour ces auteurs, les résultats obtenus par MOCP avec la méthode de référence WHO/EURO ont atteint un plateau de reproductibilité, les différences systématiques entre les laboratoires étant au maximum de 1,8 fois.

Les règles de comptage adoptées pour les fibres dénombrables influencent également le résultat. Les principales différences entre les méthodes NIOSH 7400 A et B et la méthode WHO/EURO concernent les règles pour l'interprétation des agrégats de fibres et des fibres attachées à des particules ainsi que le rapport $L/\varnothing$ minimum pris en compte pour définir les fibres dénombrables (Breyse *et al.* 1994). Dans la méthode NIOSH 7400 B, seules les fibres avec un rapport $L/\varnothing$ supérieur ou égal à 5 sont prises en considération. La comparaison de la méthode NIOSH 7400 B avec les méthodes NIOSH 7400 A et WHO 1985 (Sheehan *et al.* 1992 ; Breyse *et al.* 1994) montre des résultats supérieurs avec ces dernières. Les résultats obtenus en utilisant la méthode NIOSH 7400 B sont en moyenne 27 % plus bas que ceux obtenus avec la méthode de référence WHO (Breyse *et al.* 1994).

Par ailleurs, Cherrie *et al.* (1986) réévaluent les concentrations en FVS obtenues par l'Institute of Occupational Medicine (IOM) d'Edimbourg sur des échantillons de filtres d'air prélevés dans les usines européennes de production de FVS pendant la période 1977-1980 (Ottewill *et al.* 1984). Ces mesures étaient réalisées dans le cadre de l'étude épidémiologique coordonnée par l'Agence Internationale de recherches sur le Cancer (IARC). Par rapport aux concentrations mesurées initialement, celles obtenues en utilisant la méthode de référence WHO sont jusqu'à 3 fois plus élevées, l'augmentation moyenne étant de 1,8 fois pour les usines de laine de roche et 2,2 fois pour les usines de laine de verre.

Conclusion

En globalisant les données des études citées ci-dessus et en ne tenant pas compte des exceptions relevées, on peut déduire que le rapport de la concentration totale en fibres de longueur supérieure ou égale à 5 μm à celle des fibres MOCP dans les filtres d'air suit le gradient :

crocidolite > chrysotile > amosite, microfibres de verre > fibres céramiques > laines d'isolation (verre, roche, laitier).

L'étendue des exceptions rapportées à propos de certaines laines d'isolation devrait être vérifiée par l'étude d'une gamme plus vaste d'échantillons. Une première approche pourrait être réalisée en déterminant, à partir de mesures en MET sur des échantillons de produits bruts broyés, le pourcentage de longueur de fibres inférieur à un diamètre déterminé suivant la formule :

$$L_{(\varnothing \leq d)} / L_{\text{totale mesurée}}$$

En prenant 0,25 μm , 1,5 et 3 μm comme diamètres de référence, on peut définir le potentiel d'un produit FVS à générer, lors de sa comminution, des

fibres qui ne seront pas visibles en MOCP, des fibres répondant aux caractéristiques définies par Stanton (1981) et des fibres respirables.

Par ailleurs, le dépôt de fibres sur les parois des cylindres protecteurs et l'utilisation des règles de comptage NIOSH 7400 B peuvent contribuer à une sous-estimation des concentrations réelles dans les études nord-américaines. Les données disponibles montrent que cette sous-estimation pourrait atteindre un facteur moyen de 2 à 3.

Remarquons qu'une sous-évaluation systématique des concentrations utilisées dans les études épidémiologiques entraînera une surestimation systématique de l'évaluation quantitative du risque lié aux fibres.

Expression des concentrations

Les durées de prélèvement des échantillons d'air relevées dans les différentes études s'attachant à déterminer l'exposition dans les usines de production et sur les chantiers d'utilisation de FVS s'échelonnent entre 10 minutes (Jaffrey 1990) et 453 minutes (Cheng *et al.* 1993). Les concentrations sont rapportées, soit sous forme de valeurs instantanées (concentration en fibres mesurée sur la durée du prélèvement), soit sous forme de valeur moyenne pondérée sur le temps (*time weighted average* : TWA). La pondération se fait par rapport à une journée de 8 heures de travail en utilisant la formule :

$$(c1 \times t1 + c2 \times t2 + \dots + cn \times tn)/8 \text{ heures,}$$

où $c1$ est la concentration mesurée pendant le temps 1 ($t1$), $c2$ la concentration mesurée pendant le temps 2, etc. En hygiène du travail, on utilise les valeurs pondérées. Les résultats sont exprimés en fibres par cm^3 ou par ml . Pour comparer les résultats obtenus par différentes études, il est important de vérifier si les concentrations sont exprimées en valeurs pondérées ou en valeurs instantanées, ces dernières pouvant représenter des pics d'exposition liés à des tâches spécifiques de courte durée. L'exposition cumulée dépend du nombre et de la durée des différentes tâches impliquant la manipulation de FVS.

Notons que les données quantitatives disponibles sur l'organisation du travail (*work pattern*) sont fragmentaires. Pour les utilisateurs de FVS, le temps passé en contact avec des atmosphères contaminées ne représente qu'une fraction de la durée totale de travail (Esmen *et al.* 1982 ; Schneider *et al.* 1993). Pour les isolateurs, Esmen *et al.* (1982) rapportent des pourcentages moyens de 31 à 47 % de la journée de travail. En moyenne, les isolateurs occupés à la pose de panneaux de laine d'isolation consacrent spécifiquement 4,3 h/j à cette activité et ceux installant des fibres en vrac par soufflage, 2,5 h/j (Schneider 1996). Les menuisiers et charpentiers danois consacrent de 0,5 à 15 % de leur temps de travail à des activités en relation avec les FVS (Schneider 1996).

Dans le cas de mesure des niveaux d'empoussiérage par les fibres synthétiques à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, les concentrations sont données dans la plupart des publications sans pondération sur le temps, les temps de prélèvement étant plus longs (jusque 40 heures) que pour les contrôles des expositions en hygiène du travail. Suivant les pays, les concentrations sont exprimées en nombre de fibres par litre ou par m³ d'air.

Pour une meilleure compréhension des données de la littérature, toutes les concentrations citées dans la suite de ce chapitre sont rapportées en fibres par millilitre (f/ml).

Données métrologiques

Production

Niveaux d'exposition actuels

Les premières mesures de concentration en fibres FVS dans l'atmosphère des usines de production datent du début des années 1970. Une synthèse des résultats de ces mesures est présentée dans les tableaux 2-3, 2-4 et 2-5.

Les tableaux 2-4 et 2-5 concernent, respectivement, les résultats obtenus dans les usines incluses dans les études multicentriques sur les cohortes d'ouvriers de production américaine et européenne. Dans les deux études, les mesures sont réalisées sur des échantillons individuels et les résultats sont fournis sous forme de concentrations moyennes pondérées sur 8 heures. Pour chaque usine, un regroupement des mesures par type d'activité (pré-production, production, maintenance...) est disponible.

- Pour les usines américaines, 316 prélèvements concernent les usines de laine de roche et de laitier et 1 137 les usines de laine de verre et de filaments continus. Le diamètre nominal des fibres produites est compris entre 1 et 16 µm, sauf pour l'usine 15 où il est compris entre 0,05 et 1,6 µm. La majorité des mesures est inférieure à 1 fibre/ml d'air.
- Pour les usines européennes, 491 prélèvements concernent la production de laine de verre et 587 la production de laine de roche. Comme mentionné précédemment les résultats rapportés dans le tableau 2-5 sont ceux réévalués par Cherrie *et al.* (1986).

D'après Cherrie et Dodgson (1986), les concentrations en fibres dans l'air ont été relativement stables depuis l'introduction des techniques de production modernes, et les mesures peuvent être considérées comme représentatives pour l'ensemble de la phase technologique tardive (actuelle) (voir p. 72). Ils notent une faible baisse des concentrations moyennes en 1986 par rapport

Tableau 2-3 Concentrations en FVS (fibres/ml d'air) dans les industries de production, gamme de concentrations moyennes. Résumé des études présentées dans le document ICPS 1988

Pays	Nombre d'unités de production	Nombre d'échantillons	Type d'échantillons	Méthode analytique	Filaments continus	Laines d'isolation	Fibres céramiques + fibres à usages spéciaux	Référence
États-Unis	15	650		MOCP	0,07-0,37	0,11-0,16	0,38	Konzen (1976)
États-Unis	16	1 500	Individuel (8 H)	MOCP + MET	< 0,003-0,005	0,2-2	1-5	Corn & Sansone (1974) ; Corn <i>et al.</i> (1976) ; Esmen <i>et al.</i> (1978, 1979a et b) ; Corn (1979) ; Esmen (1984)
Grande-Bretagne	25	950	Individuel + stationnaire (> 4 H)	MOCP	< 0,2	0,12-0,89	0,8-3,7	HSC (1979) ; Head & Wagg (1980)
États-Unis	7	200	Individuel (8 H)	MOCP + MET	0,017-0,062	0,03-0,72	0,05-6,77	Hammad & Esmen (1984)
États-Unis	11	> 300	Individuel + stationnaire	MOCP + ME		0,04-0,2	0,8-21,9	Dement (1975)
Allemagne	NS	NS		MOCP + MEB		0,1-0,5		Reidiger (1984)
Pologne	4	NS	Stationnaire	MOCP	0,1-0,46	0,1-0,6		Induski <i>et al.</i> (1984)
États-Unis	3	430	Individuel (8 H)	MOCP + MET				voir Tableau 2-4
Europe	10	100	Selon méthode de référence OMS	MOCP + MEB	< 0,01			voir Tableau 2-5

NS : non spécifié

MOCP : microscopie optique à contraste de phase

ME : microscopie électronique ; MET : microscopie électronique à transmission ; MEB : microscopie électronique à balayage.

Tableau 2-4 Concentration en FVS (fibres/ml d'air) dans les usines de production aux Etats-Unis. Mesures en microscopie optique à contraste de phase, valeurs pondérées sur 8h, échantillons individuels. D'après Esmen *et al.* (1979) résumé dans le document IARC monograph 43 (1988)

Usine	Type de fibre	Nombre d'échantillons	Concentration moyenne $\pm$ SD	Pourcentage d'échantillons avec moins de	
				0,5 f/ml air	1 f/ml air
Laine de roche et de laitier					
2	Laitier	55	0,11 $\pm$ 0,12	96,4	100
5	Laitier	60	0,02 $\pm$ 0,02	100	100
7	Roche	63	0,34 $\pm$ 0,35	81	92,1
11	Laitier	66	0,05 $\pm$ 0,05	100	100
13	Roche + laitier	72	0,10 $\pm$ 0,10	97,5	100
Laine et filaments continus de verre					
1	Laine et filaments continus	97	0,01 $\pm$ 0,25	98,0	98,0
3	Laine	70	0,04 $\pm$ 0,10	97,2	100
4	Laine et mixte	90	0,04 $\pm$ 0,08	100	100
6	Laine, filaments continus et mixte	111	0,01 $\pm$ 0,03	100	100
8	Laine	105	0,02 $\pm$ 0,02	100	100
9	Laine	89	0,02 $\pm$ 0,01	100	100
10	Filaments continus	97	0,002 $\pm$ 0,003	100	100
12	Laine, filaments continus et mixte	225	0,01 $\pm$ 0,02	100	100
14	Filaments continus	84	0,04 $\pm$ 0,03	98,8	100
15	Laine	79	0,78 $\pm$ 2,1	69,3	81,3
16	Laine	90	0,04 $\pm$ 0,12	98,9	100

aux mesures de 1977-1980, mais l'amplitude de cette modification est faible ($< 0,01$ - $0,05$ f/ml vs $0,02$ - $0,10$ f/ml pour la production de laine de verre et $0,02$ - $0,10$ f/ml vs $0,05$ - $0,14$ f/ml pour la production de laine de roche).

Esmen (1982) montre qu'il existe une bonne corrélation entre le diamètre nominal des fibres produites et la concentration en fibres dans l'air. Les fibres les plus fines conduisent aux concentrations les plus élevées.

Les résultats d'une série d'études ponctuelles ou plus récentes, classés par type de fibres, sont résumés dans les paragraphes suivants.

Filaments continus de verre Lors de mesures réalisées par MOCP sur des échantillons individuels prélevés dans une usine de production suédoise, Krantz (1988) ne détecte aucune fibre.

Tableau 2-5 Concentration en FVS (fibres/ml d'air) dans les usines de production de laines d'isolation en Europe. Mesures en microscopie optique à contraste de phase, valeurs pondérées sur 8h, échantillons individuels. Valeurs réévaluées par Cherrie *et al.* (1986) à partir des mesures pour la période 1977-1980 publiées par Ottery *et al.* (1984). Adapté de IARC monograph 43 (1988)

Usine	Nombre d'échantillons	Concentration moyenne	Étendue
Laine de verre			
2	80	0,02	< 0,01-0,21
6	86	0,03	< 0,01-0,17
7	139	0,2	0,01-4,02
10	186	0,05	< 0,01-1,39
Laine de roche			
1	112	0,14	0,01-0,37
3	65	0,13	0,03-0,41
4	103	0,06	0,01-0,33
5	64	0,05	0,01-0,15
8	66	0,08	0,01-0,36
9	177	0,15	< 0,01-1,37

Davies et Cherrie (1992) ont mesuré les concentrations en fibres sur des échantillons d'ambiance (statiques) dans une usine de production en Grande-Bretagne. La concentration en fibre respirables est de < 0,001 à 0,01 f/ml air pour 11 échantillons examinés par MOCP et de < 0,001 à 0,017 f/ml air pour 26 échantillons examinés en MEB. La concentration en fibres totales déterminé en MEB va de < 0,001 à 0,069 f/ml air. L'analyse chimique en spectrométrie de rayons X en dispersion d'énergie montre que la plupart des fibres détectées en MEB n'ont pas une composition compatible avec celle des filaments continus. Dans cette étude, la concentration la plus élevée en fibres respirables est observée dans une zone en cours de maintenance.

Laines d'isolation Dans l'étude de Krantz (1988), 1 350 échantillons individuels prélevés pendant 2 à 8 heures sur 500 sites dans 10 usines suédoises ont été examinés par MOCP. Sept des usines produisent des laines d'isolation (verre ou roche). Les concentrations moyennes sont de 0,2 f/ml (étendue : 0,01-2,6 f/ml) pour la laine de roche et 0,18 f/ml (étendue : 0,01-1,8 f/ml) pour la laine de verre.

Kauffer *et al.* (1987) ont examiné par MOCP 50 échantillons individuels prélevés dans deux usines de production de laine de verre françaises. La concentration moyenne est de 0,06 f/ml (étendue : 0,01-0,12 f/ml) pour les ouvriers de production et 0,11 f/ml (étendue : 0,02-2,0 f/ml) pour les ouvriers

de finition et de transformation de l'usine A. Pour l'usine B, ces concentrations sont respectivement de 0,13 f/ml (étendue : 0,05-0,27 f/ml) et 0,18 f/ml (étendue : 0,07-0,29 f/ml).

Fibres céramiques réfractaires Kauffer *et al.* (1990) ont examiné par MOCP 9 échantillons individuels prélevés dans une usine de production de fibres céramiques réfractaires française. La concentration moyenne en fibres est de 0,76 f/ml (étendue : 0,24-1,75 f/ml).

Au Japon, Hori *et al.* (1993) ont mesuré par MOCP (méthode NIOSH, prélèvements de 3 à 6 heures) des concentrations de 0,06 à 0,86 f/ml sur 20 échantillons d'ambiance (statiques) et de 0,09 à 3,69 f/ml sur 10 échantillons individuels. Le diamètre médian des fibres dans l'air était de 0,86 à 1,16 µm et leur longueur médiane de 12,5 à 14,7 µm. Dans cette étude, les concentrations mesurées sur les échantillons personnels sont généralement plus élevées que celles mesurées sur les échantillons stationnaires.

Burge *et al.* (1995) ont mesuré la concentration en fibres respirables par MOCP sur des échantillons individuels (342) prélevés sur l'ensemble de la journée de travail dans 2 usines en Grande-Bretagne, 4 en France et 1 en Allemagne. La production a débuté entre 1965 et 1977. Les concentrations moyennes vont de 0,2 à 0,88 f/ml air pour les ouvriers de production, de 0,49 à 1,36 f/ml pour les ouvriers affectés à la transformation en produits finis (blocs, modules, cordes...) et sont inférieures à 0,5 f/ml pour les ouvriers affectés à d'autres tâches. La concentration maximum rapportée sur la figure publiée dans cette étude est de 3,5 f/ml. Trethowan *et al.* (1995) rapporte que 1,8 % des ouvriers de ces mêmes usines sont exposés à des concentrations supérieures ou égales à 1 f/ml.

Pour les États-Unis, Rice *et al.* (1997) rapportent des concentrations pondérées sur 8 heures dans 7 usines de production et/ou de transformation de fibres céramiques réfractaires. Ils estiment que les concentrations actuelles sont comprises entre des valeurs inférieures à la limite de détection et 0,66 f/ml. Les concentrations pondérées sur 8 heures, mesurées par Hall *et al.* (1997) dans 5 usines (504 échantillons individuels, MOCP méthode NIOSH « B »), sont inférieures à 0,1 f/ml pour 54,6 % des échantillons, comprises entre 0,1 et 0,49 f/ml pour 34,5 % des échantillons et supérieures ou égales à 0,5 f/ml pour 10,9 % des échantillons. Ces auteurs ne notent pas d'influence de la pause de travail sur la concentration en fibres dans l'air.

Fibres à usage spéciaux Krantz (1988) rapporte une concentration moyenne de 1,4 f/ml (étendue : 0,45-1,9 f/ml) dans une usine de production de fibre de roche à usage spécial (Inorphil), et de 0,47 f/ml (étendue : 0,08-2,4 f/ml) dans une usine de production de fibre de verre à usage spécial (protège-tympons). Dans les deux cas, la production est réalisée sans liant ni agent supprimeur de poussières.

Données historiques et reconstitution

En l'absence de mesures des concentrations en fibres dans l'air des unités de production des FVS pour les périodes anciennes (avant 1970), il faut se baser sur des extrapolations prenant en compte les facteurs susceptibles de modifier ces concentrations ou sur des résultats de mesures réalisées lors de simulations des conditions de production ayant prévalu dans le passé. Ces données ont été développées en vue d'une utilisation dans les études épidémiologiques sur la cohorte européenne d'ouvriers de production de FVS.

Facteurs influençant la concentration en fibres dans l'air Cherrie et Dodgson (1986) ont résumé les facteurs ayant une influence sur la concentration en fibres dans l'air lors de la production des FVS. Ils reconnaissent :

- le diamètre des fibres dans le produit,
- le contenu en huile (agent supprimeur de poussières) et en liant du produit,
- le type de procédé de production (continu ou discontinu),
- la taille du bâtiment,
- le taux de production,
- la ventilation,
- le nettoyage des lieux de travail,
- le type de procédé de finition (*secondary production process*).

Ohberg (1987) prend également en considération l'automatisation des lignes de production et la diversification des produits finis fabriqués dans une même unité, cette diversification étant source de manipulations supplémentaires. Pour cet auteur, les principaux facteurs conduisant à une augmentation des concentrations en fibres dans l'air sont le taux de production et le contenu en fibres fines du produit, le principal facteur de réduction des concentrations étant l'utilisation d'agents supprimeurs de poussières (huile).

Phases technologiques de l'industrie de production des laines de verre et de roche/laitier L'évolution des techniques de production dans les différentes usines ont entraîné des modifications importantes dans le diamètre des fibres produites (tendance générale à une réduction du diamètre nominal) et dans les concentrations en fibres dans l'air. Afin de tenir compte de ces modifications dans les études épidémiologiques, l'activité des sites de production a été divisée en deux ou trois phases technologiques distinctes. La phase technologique ancienne est caractérisée par l'utilisation de méthodes de production discontinues (par lots) et par l'absence d'agents supprimeurs de poussières. Dans la phase technologique récente (actuelle), la production se fait en continu avec addition d'agents anti-poussières. Certaines usines sont passées par une phase intermédiaire au cours de laquelle on a utilisé simultanément un mélange des différents types de technique de production. Comme les notions de phases technologiques anciennes et récentes sont basées sur des différences de méthodes de fabrication, la date de passage de l'une à l'autre est différente pour chaque usine de production.

Dans les usines de production de laine d'isolation incluses dans la cohorte européenne, le passage à la phase technologique actuelle se fait entre 1951 et 1969. Suivant les usines, les conditions de la phase technologique ancienne ont prévalu jusque 1940 à 1961. Le tableau 2-6 reprend le détail de ces dates.

Simulations des conditions de production antérieures Dans une expérience re-créant de façon réaliste les conditions de production existant dans l'industrie de production de la laine de roche pendant les années 1940, Cherrie *et al.* (1987) ont testé l'influence de l'utilisation d'huile comme agent supprimeur de poussières sur les concentrations en fibres. Suivant les situations, la concentration en fibres est réduite d'un facteur 3 à 9. On ne note pas de différence importante de diamètre ou de longueur pour les fibres produites avec ou sans huile. Les résultats sont résumés au tableau 2-7.

Modélisation des expositions anciennes En l'absence de données concernant les concentrations en fibres dans l'air des usines de production de FVS pour la période s'étalant du début de la production des FVS au début des années 1970, il s'est avéré nécessaire de développer des procédures permettant d'obtenir des estimations fiables.

Dodgson *et al.* (1987) ont utilisé un modèle mathématique pour retracer l'évolution de ces concentrations pour chaque usine de production de laine de

Tableau 2-6 Dates critiques pour la subdivision de l'historique de la production des laines minérales d'isolation dans les usines étudiées dans la cohorte européenne.
D'après Cherrie & Dodgson (1986) ; Simonato *et al.* (1986)

Code usine	Pays	Début de la production	Avant cette date pas d'agents supprimeurs de poussières et/ou production discontinuée	Date de passage aux conditions de production actuelles
Laine de roche ou de laitier				
01	Danemark	1937	1940	1953
03	Norvège	1950	1954	1956
04	Norvège	1940	1946	1955
05	Norvège	1948		1961
08	Suède	1943	1950	1956
09	Suède	1938	1945	1951
12	Allemagne	1941		
Laine de verre				
02	Finlande	1941	1959	1959
06	Norvège	1935	1960	1969
07	Suède	1933	1961	1961
10	Grande Bretagne	1943	1945	1968
14	Italie	1946	1961	1961

Tableau 2-7 Concentrations en fibres mesurées lors d'une simulation des conditions de production anciennes ($\approx$ 1940) de laine de roche/laitier. Mesures par MOCP, concentrations pondérées sur 8 h, moyennes (étendue), en fibres/ml. D'après Cherrie *et al.* (1987)

	Avec huile	Sans huile	Rapport
Production			
Production des fibres	1,8 (1,5-2,1)	6,5 (5,9-7,2)	3,6
Découpe	1,1 (0,9-1,2)	3,5 (3,3-3,8)	3,2
Travail intensif avec de la laine en vrac			
Fabrication de rouleaux	1,2 (1,0-1,5)	11 (10-12)	9,2
Fabrication de blocs	1,9 (1,8-2,1)	13 (11-16)	6,8

verre de roche et de laitier incluses dans l'étude épidémiologique européenne en tenant compte de l'historique du développement technologique de ces usines. Ils estiment que l'utilisation d'agents supprimeurs de poussières a permis de réduire les concentrations en fibres par un facteur 10, alors que la réduction du diamètre nominal moyen des fibres produites de 30 à 3 μm a engendré un effet inverse du même ordre de grandeur. Le modèle prend en compte des facteurs de pondération pour la ventilation, le taux de production, l'utilisation d'agents supprimeurs de poussières, le diamètre des fibres produites et les procédés de production discontinus. Le modèle prédit des concentrations moyennes de 1 à 2 f/ml air pendant la phase technologique ancienne de la production de laine de roche/laitier. Des concentrations de 10 f/ml air auraient pu être atteintes pour les postes de travail les plus empoussiérés. Le modèle prédit des concentrations substantiellement moins élevées pour la production de laine de verre pendant la même période. Elles sont probablement du même ordre de grandeur que celles observées actuellement (Tableau 2-8). Une révision des données de ce modèle par Krantz *et al.* (1991) aboutit à une réduction des concentrations moyennes estimées pour les usines de production de laine de roche/laitier en phase technologique ancienne (0,2-1,1 f/ml air). Cette réduction est essentiellement due à une réduction de 8 à 5 pour le facteur de pondération attribué à l'utilisation de supprimeurs de poussières.

Plato *et al.* (1995) comparent deux méthodes d'évaluation des expositions cumulées durant la période 1938-1990 dans deux usines de production de laine de roche et de laine de laitier suédoises. Le modèle I est basé sur des moyennes par usines ; le modèle II incorpore des facteurs de pondération complémentaires basés sur les postes de travail. Ils concluent à une meilleure validité du modèle II et estiment que la durée d'emploi avant 1950 contribue pour un large part à l'exposition cumulée des ouvriers exposés dans ces usines.

Tableau 2-8 Synthèse des concentrations en fibres dans l'air estimées dans les usines de production de laines de roche/laitier et de laine de verre incluses dans l'étude de cohorte européenne en fonction des différentes phases technologiques. Concentrations pondérées sur le temps (TWA 8 h), en fibres /ml. D'après Dodgson *et al.* (1987)

Phase technologique	Laine de roche/laitier		Laine de verre	
	borne inférieure minimum-maximum	borne supérieure minimum-maximum	borne inférieure minimum-maximum	borne supérieure minimum-maximum
Précoce	0,05-0,46	0,21-1,92	0,01-0,01	0,02-0,11
Intermédiaire	0,06-0,25	0,15-0,69	0,01	0,38
Actuelle	0,05-0,09	0,09-0,13	0,02-0,04	0,03-0,07

Utilisateurs

Les utilisations des filaments continus de verre, des fibres céramiques et des fibres super fines codifiées dans le cadre d'élaboration d'une matrice emploi-exposition aux fibres minérales synthétiques pour l'analyse regroupée d'enquêtes sur les cancers naso-sinusiens sont reprises au tableau 2-9. Les données concernant l'exposition de divers groupes d'utilisateurs de FVS sont synthétisées dans le tableau 2-10. Le tableau 2-11 reprend les niveaux d'exposition mesurés lors de l'utilisation des fibres céramiques.

Plusieurs remarques sont à faire à propos de l'exposition des utilisateurs aux FVS.

- Le temps réellement passé en contact avec l'atmosphère « polluée » par des FVS ne représente qu'une fraction du temps total de travail. Cette fraction est très variable en fonction du métier et du chantier (voir p. 66).

Tableau 2-9 A Objets à base de laines minérales

Fibres en vrac	
Isolations thermiques industrielles	Fours Chaudières Appareils électroménagers
Isolations thermiques pour les bâtiments	Rouleaux, coquilles, panneaux, matelas
Garnitures de gaines d'aération	
Protections contre l'incendie	Valves, clapets, portes coupe-feu
Flocage	
Cloisons, dalles de plafonds	
Tresses	
Milieu de culture en horticulture	

Tableau 2-9 B Opérations pouvant occasionner une exposition aux laines minérales (LM)

Production de LM	Projection
Interventions sur flochage	Enlèvement
	Travail au voisinage de flochage
Interventions sur rouleaux, matelas, coquilles, panneaux	Pose
	Dépose
	Découpe à la main
	Découpe avec un outil mécanique
	Perçage
Interventions sur calorifuge industriel	Fours industriels
	Tuyauterie
	Étuves et autoclaves
	Chaudières
	Turbines
	Industrie nucléaire
	Installations de distillation
	Isolation d'appareils électriques
	Matériel frigorifique
Manipulation de LM en vrac	Soufflage
	Pose
Utilisation de laines minérales en horticulture	
Travaux de nettoyage	Balayage
	Nettoyage à l'aspirateur
Démolition	
Manutention, transport, distribution, stockage	
Travail au voisinage d'un poste polluant	

• Le travail en espace confiné sans ventilation peut mener à des concentrations en fibres dans l'air plus importantes que le travail dans des zones étendues avec renouvellement d'air. La remise en suspension répétée de poussières et de fibres dans des espaces mal ventilés entraîne un accroissement de la concentration en fibres dans l'air (Head & Wagg 1980 ; Jullier *et al.* 1993 ; Strubel & Faul 1994). Esmen et Erdal (1990) rapportent que les concentrations en fibres dans les espaces confinés ou mal ventilés sont un ordre de grandeur plus élevées que celles observées dans l'industrie de production.

• Il n'existe à notre connaissance qu'une seule étude abordant de façon ponctuelle le problème du retrait, de la démolition ou de l'intervention sur isolations en FVS (laines de verre ou de roche) dans les bâtiments publics ou privés (Schneider 1979) (Tableau 2-10/C).

• Lors du retrait de produits en place ayant subi un vieillissement thermique (incendie, isolation de conduites chaudes, isolation de fours), il y a lieu de prendre en compte les modification de structure des produits engendrées par l'exposition à la chaleur.

Les fibres de verre ramollissent aux alentours de 650-700 °C et fondent au-dessus de 850 °C. Elles ne recristallisent pas à haute température. Les fibres

Tableau 2-9 C Fibres de céramique : applications en dehors de l'industrie productrice

Fibres en vrac	Utilisation en bourrage et remplissage hautes températures Joints d'expansion, joints d'étanchéité de fours, isolation de conduits de cheminées métalliques, isolation de blindage de fours et d'enceintes thermiques, isolation de structures compliquées.
Fibre technique	Additifs pour peintures, renforcements, bourrages
Nappes	Garnissage de fours industriels Refroidissement contrôlé de pièces de fonderie Recuit de soudure sur site Joints d'étanchéité de fours Support de catalyse Boucliers thermiques et phoniques sur automobiles Isolation électrique et phonique haute température Isolation dans l'industrie nucléaire Protection contre l'incendie dans le bâtiment Isolations d'appareils électroménagers Carneaux de fumée en raffinerie Chenaux de coulée de métaux non-ferreux Rideaux de fours Écrans thermiques et vêtements d'intervention Pare-vapeurs Isolation de cheminées domestiques
Feutres et papiers	Garnissage de chambres de combustion de chaudières Joints de dilatation Calorifugeage de poche de fonderie Isolation de pots d'échappement
Panneaux rigides	Isolations de portes de chaudières domestiques ou industrielles
Modules à coller	Réfection et isolation de maçonnerie réfractaire Garnissage de fours industriels
Textile	Isolation de tuyauterie
Produits non façonnés	Béton : garnissage de poches de coulée de fonderie Mastic : maçonnerie Colles et enduits

Tableau 2-9 D Objets à base de filaments continus

Matériaux composites (résines)	Bâtis d'appareils électriques et électroniques Pièces pour équipements de transport (aéronautique, véhicules automobiles, bateaux, chemins de fer) Pièces pour le bâtiment
Matériaux de construction	Ciment Matériaux de couverture (tissus et papier)
Tissus	Circuits imprimés Isolations de câbles électriques Prothèses orthopédiques Cordes Renforcements de pneus Rideaux de protection thermique
Filtres	

Tableau 2-9 E Objets à base de fibres super fines

Séparateurs dans des batteries
Filtres (Filtration d'air - Filtration de liquides)
Isolations thermiques et phoniques (aéronautique)
Isolations de chambres de combustion, de lingotières
Isolation cryogénique
Produits de bouchage (fourneaux de fonderie)

Tableau 2-9 F Opérations pouvant occasionner une exposition aux fibres super fines

Productions de produits à base de fibres super fines
Interventions sur des isolations thermiques et phoniques
Interventions sur lingotières
Interventions sur séparateurs de batteries
Interventions sur filtres
Manutention et distribution
Nettoyage
Travail au voisinage de postes polluants
Utilisation de produits de bouchage

de roche et de laitier vont se dévitrifier au-dessus de 850 °C. Il va se former de la pseudo-wollastonite ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) et de l'anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), mais pas de cristobalite (SiO_2 : forme quadratique de la silice amorphe). D'un point de vue structural, elles sont stables jusqu'à 1 225-1 360 °C. La température d'un foyer d'incendie peut atteindre 925 °C après une heure et 1 030 °C après 2 heures (TIMA 1991).

Notons par ailleurs que l'exposition à des températures élevées va aboutir à la dégradation des liants et des agents supprimeurs de poussières. Les concentrations moyennes en fibres dans l'air observées par ces auteurs lors du démantèlement de calorifuges en FVS de tuyaux en chimie industrielles sont plus élevées que lors de la pose des isolants ($0,32 \pm 0,22$ f/ml vs $0,10 \pm 0,10$ f/ml) (Jullier *et al.* 1993).

Les fibres réfractaires à base de kaolin ou de mélange silice-alumine 50/50 se dévitrifient au-dessus de 1 000 °C. Il y a formation de mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) et de cristobalite (SiO_2 quadratique). Dyson *et al.* (1997) montrent que la vitesse de dévitrification augmente avec la température « de service » de l'isolant. La dévitrification est importante dans les dix premiers centimètres à partir de la surface chaude des fours. Strubbel et Faul (1994) associent les concentrations élevées en fibres (jusque 23 f/ml air) observées

Tableau 2-10 A Utilisation de laines minérales (LM) ou de fibres de verre (FV) en vrac (espace confiné)

Référence	Matériaux et tâches	Niveau (f/ml) en MOCP	Nombre de prélèvements	Commentaire
Fowler <i>et al.</i> 1971	Calorifugeurs	0,5-8 ; moyenne 5,0		
Head et Wagg 1980	LM en vrac	0,54-20,9 ; moyenne 8,19	6	
Esmen <i>et al.</i> 1982	Soufflage de fibres de verre sous les combles	0,19-4,8 ; moyenne 2,40	16	Fibres respirables : 44 %
	Soufflage de laines minérales sous les combles	0,44-20 ; moyenne 5,3	23	Fibres respirables : 48 %
	Exposition pondérée sur 8 h			Fibres respirables :
	- fibres minérales	0,78		0,70 f/ml (MOCP + ME) sur 46 j
Corn <i>et al.</i> 1990 (Rapport TIMA)	- laines minérales	2,4		2,0 f/ml (MOCP + ME) sur 31 j
	FV en vrac avec liant			
	- chargeur	0,06-0,69 ; moyenne 0,19	24	
	- installateur	0,18-1,20 ; moyenne 0,53	26	
	FV en vrac sans liant			
	- chargeur	0,06-9,36 moyenne 1,82	11	
	- installateur	1,36-18,4 ; moyenne 7,40	20	
	LM en vrac sans liant			
Jacob <i>et al.</i> 1992	- chargeur	0,07-0,53 ; moyenne 0,27	9	
	- installateur	0,32-1,69 ; moyenne 0,90	7	
	Soufflage de FV avec liant	1,03-2,1 pic 6	131	Fibres respirables : 0,30-0,80 Durée des prélèvements : 20 min
Lees <i>et al.</i> 1993	LM ou FV en vrac sans liant	1,94-7,67	31	Durée des prélèvements : 47-72 min
	FV en vrac avec liant	0,55	29	
Kauffer <i>et al.</i> 1993	Manipulation et soufflage de LM en vrac	2,3-3,71 ; moyenne 2,79	np	Il s'agit de fibres respirables
Jaffrey <i>et al.</i> 1990	LM en vrac			Fibres respirables > 66 %
	- pose	0,43 (MET)	np	Durée des prélèvements : environ 1 h
	- soufflage	0,5-0,7 (MET)		Durée des prélèvements : 10-30 min

np : non précisé.

Tableau 2-10 B Utilisation de matelas de laines minérales ou fibres de verre (espace confiné)

Référence	Matériaux et tâches	Niveau (t/mi)	Nombre de prélèvements	Commentaire
Head & Wagg 1980	Pose de couvertures de LV sous les combles	0,38-1,02 ; max 1,76	12	MOCP Il s'agit de fibres respirables
Esmen <i>et al.</i> 1982	Opérations sur des matelas de LM dans l'industrie aéronautique	0,02-0,56	51	MOCP Proportion de fibres respirables : 93 %-99 %
Marconi <i>et al.</i> 1987	Calorifugeage de paquebots (matelas de laine de roche)	0,009-0,410 moyenne : 0,130	14	Proportion de fibres respirables : 66 %
Corn <i>et al.</i> 1990 (Rapport TIMA)	Matelas de LM	0,34-0,40 moyenne : 0,37	2	MOCP (combles)
	Matelas de FV	0,04-0,34 moyenne : 0,15	23	Il s'agit de fibres respirables
Jaffrey <i>et al.</i> 1990	Matelas de laine de roche	0,08-0,23	6	(combles)
	Matelas de laine verre	0,18-1,76	5	MET
Jacob <i>et al.</i> 1992	Matelas de FV	moyenne : 0,22 95 ^e percentile : 0,56	142	20 % sont des fibres de verre respirables
Kauffer <i>et al.</i> 1993	Pose découpe de produit avec liant	0,08-1,49 moyenne : 0,39	14	Prélèvements par des laboratoires des caisses régionales d'Assurance Maladie
Lees <i>et al.</i> 1993	Poseur de matelas de FV	0,02-0,41 moyenne : 0,23	24	MOCP (sous les combles) Il s'agit de fibres respirables
	Poseur de matelas de LM	0,07-0,39 moyenne 0,17	8	
Plato <i>et al.</i> 1995	Calorifugeurs dans la production de préfabriqués	< 0,1 t/mi actuellement 0,18 dans les années 1970	58	MOCP Il s'agit de fibres respirables

Tableau 2-10 C Autres expositions. Utilisation de produits prêts à l'emploi

Référence	Matériaux et tâches	Niveau (f/ml)	Nombre de prélèvements	Commentaire
Head & Wagg 1980	Isolation de pots d'échappement de moteurs dans l'industrie	0,07-0,10	15	MOCP (sous les combles) Il s'agit de fibres respirables
Esmen <i>et al.</i> 1982	Pose de plafonds acoustiques	0,0018-0,028 moyenne : 0,01	12	MOCP Fibres respirables : 55 %
	Fabrication des gaines à partir de panneaux rigides et pose	0,03-0,05	13	Fibres respirables : 71 %-82 %
	Isolation de conduits et tuyaux	0,03-0,05	50	Fibres respirables : 71 %-82 %
Kauffer <i>et al.</i> 1993	Isolation de conteneurs (bobinage de bourrelet de FV)	0,58-1,88 ; moyenne : 0,97	np	Prélèvements par des laboratoires de contrôle des caisses régionales d'Assurance Maladie.
	Isolation de tuyaux	0,09	np	
Plato <i>et al.</i> 1995	Calorifugeurs dans la production de pavillons préfabriqués	< 0,1 f/ml	58	MOCP Comptage des fibres respirables Travail dans des ateliers bien ventilés
Kauffer <i>et al.</i> 1993	Flocage par voie humide	0,16-0,43 ; moyenne 0,24	8	
Schneider <i>et al.</i> 1979	Enlèvement de calorifuge sous forme de matelas, posé en 1951	4-25 ; moyenne 9	np	MOCP

Tableau 2-11 Exposition des utilisateurs de fibres céramiques

Référence	Matériaux et tâches	Nb échant.	Niveau (f/ml)	Commentaire
Isolations de fours industriels				
Strübel & Faul 1994	Assemblage d'isolations de fours (assemblage, déballage, découpe, bourrage de joints)	19	médiane 1,04 étendue 0,38-2,45	méthode non précisée 25,8 à 51,5 % de fibres de diamètre inférieur à 1 µm
	Autres travaux (mise en forme sous vide, sciage et découpe <i>reworking</i>)	14	médiane 1,0 étendue 0,14-7,02	18,2 à 57,6 % de fibres de diamètre inférieur à 1 µm
	Réparation et démolition de fours en place depuis 2 ans	15	médiane 1,0 étendue 0,14-7,02	18,6 à 60,9 % de fibres de diamètre inférieur à 1 µm
Interventions sur fours industriels				
Head & Wagg 1980	Installation de calorifuge de fours pour ouvrages en céramique	18	1,03-2,58	moyennes de séries de prélèvements
			0,39-5,70	valeurs extrêmes
Friar & Philips (HSE 1989)	Construction de fours pour ouvrages en céramique	1	1,75	
	Remplacement de panneaux de garniture de four	1	1,2	
Cheng <i>et al.</i> 1992	Travaux de réparation de fours (chimie et pétrochimie)	114	0,02-1,3 pics à 17 f/ml	moyenne de séries de prélèvements
Utilisation de nappes en céramique				
Corn <i>et al.</i> 1992	Utilisation de nappes lors de la coulée du métal	20	0,86 (moyenne)	
Friar & Philips (HSE 1989)	Manipulation de nappes	1	1,0	
	Travaux de calorifugeage avec des nappes	1	1,0	
Soudure et oxycoupage				
Cheng <i>et al.</i> 1992	Soudure et oxycoupage lors de réfection de fours industriels	11	0,39 (moyenne)	
			0,003-17	valeurs extrêmes
Friar & Philips (HSE 1989)	Utilisation de couvertures en céramique lors de la soudure	1	0,8	

Tableau 2-11 Exposition des utilisateurs de fibres céramiques (suite)

Référence	Matériaux et tâches	Nb échant.	Niveau (f/ml)	Commentaire
Manipulation de panneaux				
Corn <i>et al.</i> 1990	Poseur de panneaux	11	2,82 (moyenne)	
Friar & Philips (HSE 1989)	Usinage de panneaux en céramique	1	0,6	
	Manipulations sans usinage de panneaux		0,1	
Maxim <i>et al.</i> 1997	Fabrication de pièces à partir de panneaux en céramique		niveau moyen sur 8 h en 1990 : 7,3 en 1996 : 0,63	
Mise en place de flocage				
Corn <i>et al.</i> 1990	Préparateur	1	1,5	
Friar & Philips (HSE 1989)	Applicateur	1	7,75	
Autres expositions				
Head & Wagg 1980	Confection de calorifuge au niveau de souches de cheminées	9	moyenne 0,44 0,09-0,87	
Maxim <i>et al.</i> 1997	Confection de souches de cheminées		niveau moyen sur 8 h en 1990 : 0,43-1,8 en 1996 : 0,17-0,43	
Head & Wagg 1980	Finition de produits coulés en céramique	2	moyenne 0,65 0,62-0,67	
	Installation de silencieux sur des moteurs industriels	3	moyenne 1,07 0,57-1,72	
Maxim <i>et al.</i> 1997	Montage de pièces en céramique (1990-1996)	418	0,16 0,005-2,2	moyenne géométrique valeurs extrêmes
	Retrait de matériaux en céramique (1990-1996)	108	0,80 0,027-5,4	moyenne géométrique valeurs extrêmes
	Installation de matériaux en céramique (1990-1996)	288	0,20 0,003-2,5	moyenne géométrique valeurs extrêmes
	Fabrication de filtres d'airbags pour automobiles		en 1990 : 0,57-1,6 en 1996 : 0,02-0,79	
	Finition de pièces électriques		en 1990 : 1,3 en 1996 : 0,59	
	Fabrication de pièces pour chauffage électrique		en 1990 : 0,14-0,41 en 1996 : 0,03-0,14	
	Production de pièce en céramique par la méthode du vide (<i>vacuum forming</i>)		en 1990 : 0,13-1,5 en 1996 : 0,07-0,32	

lors du démantèlement d'isolations de fours à base de fibres céramiques à une augmentation de la friabilité des fibres par suite de leur recristallisation. L'ensemble des poussières récoltées par filtrage d'air lors de ces activités contiennent jusqu'à 20 % de cristobalite (Gantner 1986).

Remarque Du point de vue de l'hygiène du travail, il y a donc lieu de considérer les produits ayant subi un vieillissement thermique, que ce soit dans des circonstances d'utilisations normales ou dans des circonstances accidentelles, de façon différente des produits neufs.

En conclusion :

- l'utilisation de **filaments continus** de verre conduit à des concentrations généralement inférieures à 0,1 f/ml ;
- lors de travaux de calorifugeage avec des **laines d'isolation** en vrac dans un espace confiné, des niveaux d'exposition supérieurs à 1 f/ml peuvent être observés ;
- lors de l'utilisation de matelas de **laines d'isolation**, les niveaux d'exposition sont généralement inférieurs à 0,5 f/ml ;
- pour l'utilisation de **laines d'isolation** sous forme de produits rigides et prêts à l'emploi, les concentrations sont généralement inférieures à 0,1 f/ml ;
- on ne dispose pas de données suffisantes sur les niveaux d'exposition lors du retrait, de la démolition ou de l'intervention sur des **laines d'isolation** ;
- dans les situations comportant une agression de matériaux à base de **fibres céramiques**, on observe souvent des concentrations supérieures à 1 f/ml ;
- lors de l'utilisation de nappes en **fibres céramiques** la concentration en fibres est de l'ordre de 1 f/ml ;
- pour de nombreuses situations il n'existe pas de données concernant l'exposition lors de l'utilisation de **fibres céramiques** (automobile, bâtiment, électroménager, industrie nucléaire) ;
- on dispose de très peu de données concernant les utilisations de **fibres super fines** (1 seule référence). Les données disponibles montrent souvent des concentrations supérieures à 1 f/ml.

En prenant en compte l'ensemble des données actuellement disponibles, on peut raisonnablement estimer qu'une partie des utilisateurs de fibres minérales artificielles, c'est-à-dire les travailleurs effectuant des tâches d'intervention active sur des matériaux contenant des fibres de substitution (ces derniers sont par ailleurs exposés simultanément, ou l'ont été fréquemment dans le passé, à des fibres d'amiante), est actuellement soumise à des concentrations comparables à celles ayant prévalu dans l'industrie pendant les périodes de production anciennes et intermédiaires.

Population générale et environnement

Les données disponibles sur les niveaux de pollution par les fibres synthétiques encourus par la population générale sont fragmentaires et peu abondantes. Elles portent sur l'intérieur et l'extérieur des bâtiments publics et privés, l'environnement urbain et rural et sur les zones proches des usines de production. Notons que pour toutes les mesures réalisées par microscopie optique, on ne possède pas de certitude sur l'identification des fibres.

Bâtiments publics

Schneider *et al.* (1990) ont mesuré les concentrations en fibres dans l'air de 93 locaux de bâtiments publics avec des panneaux de plafond contenant des FVS intacts et 12 locaux de référence. Les mesures sont réalisées par MOCF et MOLP sur des échantillons statiques. La concentration moyenne en fibres respirables pour l'ensemble des locaux est de $0,000082 \pm 0,000195$ f/ml (étendue : 0-0,001660 f/ml). Il n'y a pas de FVS respirables dans l'air de 34 des 93 locaux exposés.

Thriene *et al.* (1996) ont mesuré les concentrations en fibres dans un bâtiment administratif dans lequel des panneaux de plafonds acoustiques à base de FVS étaient installés. Ces mesures faisaient suite à des plaintes des employés, essentiellement pour irritation cutanée et oculaire. Les bords des panneaux étaient partiellement endommagés. Les mesures de concentration ont été réalisées sur des échantillons stationnaires par microscopie électronique à balayage suivant la méthode VDI 3492. La concentration en fibres de diamètre $< 3 \mu\text{m}$ est de 0,001 à 0,0035 f/ml et celle en fibres de diamètre $> 3 \mu\text{m}$ de 0,0001 à 0,0002 f/ml. Une expérience de scellement des bords des panneaux ramène les concentrations en fibres dans les locaux à des valeurs proches de zéro.

Bâtiments privés

En ce qui concerne les bâtiments privés, les mesures réalisées pour servir de niveaux de référence et de contrôle avant et après isolation de maisons permettent d'estimer l'exposition des personnes vivant dans ces habitations.

van der Wal *et al.* (1987) ont mesuré les concentrations en fibres dans l'air de maisons d'habitation pendant et après soufflage de FVS dans des murs creux. Les concentrations moyennes mesurées à l'intérieur des maisons par MOCF varient de 0,005 à 0,025 f/ml, avec un pic à 0,065 f/ml pendant soufflage et de 0,001 à 0,01 f/ml le jour suivant.

Jaffrey (1990) a effectué une étude dans 12 habitations (250 échantillons) avant, pendant et après installations d'isolations en FVS (laine de verre et de

roche, en matelas ou soufflée). Les analyses ont été réalisées par microscopie électronique à transmission avec spectromètre de rayons X en dispersion d'énergie (META). Les niveaux de base de la pollution intérieure ont été obtenus 64 à 48 heures avant l'isolation. Les résultats sont inférieurs à 0,002 f/ml (sensibilité analytique) avant et une semaine après l'installation.

Dans une étude similaire, Miller *et al.* (1995) ont mesuré des concentrations en fibres pré-installation s'échelonnant entre 0,002 et 0,011 f/ml par MOCF (méthode NIOSH 7400 A). Les concentrations mesurées 24 h après installation de l'isolation vont de 0,003 à 0,015 f/ml. Toutes les concentrations en FVS mesurées par microscopie électronique à balayage au cours de cette étude sont inférieures à 0,01 f/ml.

Jaffrey *et al.* (1990) ont également mesuré, par microscopie électronique à transmission, les concentrations en fibres lors de chocs répétés (perturbations mineures) ou de manipulations prolongées (perturbations majeures) des isolations de combles en place. Pour les perturbations mineures, aucune fibre n'est détectée dans 6 des 11 échantillons statiques prélevés, la concentration maximale étant de 0,01 f/ml ; les échantillons individuels montrent des valeurs s'échelonnant entre 0,03 et 0,11 f/ml. Lors des perturbations majeures les concentrations relevées s'échelonnent entre < 0,002 et 0,3 f/ml pour les échantillons statiques et < 0,009 à 0,2 f/ml pour les échantillons personnels.

Environnement urbain

Une première étude réalisée en France en 1989 (Gaudichet *et al.* 1989) par microscopie optique en lumière polarisée (MOLP), à l'intérieur (79 échantillons) et à l'extérieur (18 échantillons) de bâtiments publics contenant des matériaux isolants à base de FVS (laine de verre ou laine de roche) sous différentes formes (flocages, panneaux, etc), donne des concentrations pour les fibres de diamètre inférieur à 3 µm variant de non détecté à $6,2 \times 10^{-3}$ f/ml à l'intérieur et de non détecté à 15×10^{-6} f/ml à l'extérieur.

Une deuxième étude a été réalisée par la même équipe avec la même méthode pendant un an à Paris (Martinon *et al.* 1996) en vue d'évaluer le niveau d'empoussièrement extérieur. Sur 116 échantillons, les valeurs rapportées vont de 6×10^{-7} à 17×10^{-7} f/ml (0,0006 à 0,0017 f/l) avec des moyennes de 4×10^{-7} f/ml à 7×10^{-7} f/ml (0,0004 à 0,0007 f/l).

Une étude pilote plus générale a été réalisée au niveau européen (Schneider *et al.* 1996) dans le but de définir l'exposition individuelle aux fibres respirables inorganiques et organiques, durant la vie courante dans trois villes d'Europe. Quatre groupes de 5 personnes ont été choisis : écoliers, retraités, employés de bureaux et chauffeurs de taxis. Les échantillons ont été analysés au microscope électronique à balayage (MEB) suivant la méthode VDI 3492 (VDI 1994). Les concentrations en fibres organiques sont en général supérieures à celles des fibres inorganiques (gypse et amiante étant comptés à part). La

concentration des fibres synthétiques n'excède pas 30 % de celle du groupe des autres fibres inorganiques, quelle que soit leur longueur (longueur minimum mesurée : 2,5 μm), soit environ 0,002 f/ml.

Environnement rural

Switala *et al.* (1994) ont mené une étude pendant les quatre saisons autour d'une usine de laine de verre et en milieu rural. Les fibres sont comptées en MOCP suivant la méthode de référence NIOSH 7400 B. Les concentrations en fibres dans l'air sont faibles dans les deux situations, 90 % des échantillons étant sous la limite de détection de 0,00001 f/ml. Les concentrations maximales retrouvées sont de 0,00014 f/ml autour de l'usine et de 0,00015 f/ml en milieu rural.

Conclusion

Le tableau 2-12 fait la synthèse des niveaux d'exposition qui peuvent être attendus dans les différentes circonstances d'exposition.

Mesures gravimétriques

Conjointement à la mesure de la concentration en fibres dans l'air, des mesures gravimétriques de la concentration pondérale en poussières totales et/ou respirables ont été réalisées dans certaines études sur l'exposition aux fibres artificielles (Head & Wagg 1980 ; Esmen 1978, 1979 ; Hammad & Esmen 1984 ; Ottery *et al.* 1984 ; Schneider 1984 ; Schneider & Breum 1987 ; Lees *et al.* 1993 ; Burge *et al.* 1995). Ces mesures répondent aux réglementations concernant les concentrations en poussières dans l'air.

La détermination des concentrations pondérales étant réalisée par simple pesée des filtres, cette technique est simple à mettre en œuvre, rapide et n'est pas sujette à des facteurs de variation liés à l'observateur, comme c'est le cas pour les méthodes microscopiques.

La détermination des concentrations pondérales peut se faire sur le filtre devant servir au comptage de fibres, mais il est préférable de réaliser un échantillonnage en parallèle. En effet, un filtre ayant une concentration en poussières adéquate pour une pesée sera généralement trop chargé en fibres et en particules pour permettre le comptage. Inversement, un filtre avec un dépôt optimal pour le comptage ne pourra être pesé qu'en utilisant des procédures très précises (Head & Wagg 1980).

Les résultats concernant les concentrations en poussières totales et/ou respirables sont synthétisés dans le tableau 2-13. Ils sont exprimés en mg de poussière totale ou respirable par m^3 d'air. D'une manière générale, il n'existe pas

Tableau 2-12 Gammes de concentrations en fibres dans l'air rencontrées dans des scénarios d'exposition typiques.
D'après Cherrie *et al.* (1986) et Schneider (1996)

Concentrations (fibres/ml) Fibres OMS ($L \geq 5 \mu\text{m}$ $\varnothing \leq 3 \mu\text{m}$)	Environnement / utilisation	Diamètre nominal des fibres produites ou utilisées (μm)	Fraction de fibres S (de Stanton) dans l'air (%)
< 0,0001	- Environnement extérieur en zone rurale - Bâtiments avec isolation thermique		
0,0001-0,001	- Environnement extérieur en zone urbaine - Bâtiments avec des dalles de plafond ou des systèmes de ventilation contenant des FMA		
0,001-0,01	- Filaments continus : production et utilisation - Fibre de verre épaisse : production et utilisation - Bâtiments avec des dalles de plafond contenant des FMA légèrement endommagés, certains systèmes de ventilation	9-25 > 10	5-25 < 5
0,01-0,1	- Laine de verre : production et production secondaire - Laine de roche : production et production secondaire - Laine de roche/laitier : production et production secondaire - Bâtiments avec des dalles de plafond contenant des FMA fortement endommagées	5-7 3-6 6-8	20-50 20-30
0,1-1,0	- Fibre de verre fine : production - Laine de roche : production secondaire et utilisation - Laine de roche/laitier (USA) - Laine de verre : utilisation - Fibre céramique réfractaire : production et utilisation	± 3 3-6 6-8 3-7	30-40 30-40 ± 30
> 1,0	- Fibre de verre très fine : production et utilisation - Laine de verre ou de roche en vrac : utilisation, soufflage dans combles - Laine de verre ou de roche sans supprimeurs de poussières : production et utilisation - Fibre céramique réfractaire : production secondaire et certaines utilisations	< 2 3-6 3-6	± 60

Tableau 2-13 Concentrations pondérales en poussières dans l'industrie de production et chez les utilisateurs de FVS**HEAD ET WAGG (1980)****Filament continu**

Production	23 échantillons 2 usines	moyenne : 0,3-1,7 mg/m ³ étendue : 0,08-4,3	Échantillons stationnaires et individuels représentatifs de tâches
Utilisation	19 échantillons 3 usines	moyenne : 1,1-47 mg/m ³ étendue : 0,03-62	Pas de valeurs pondérées

Laines d'isolation

Production	100 échantillons 4 usines	moyenne : 1,1-25,2 mg/m ³ étendue : 0,4-78,2	
Utilisation			
- Bâtiments	22 échantillons	moyenne : 14,9-36,2 mg/m ³ étendue : 1,9-90	
- Autres (isolation de moteurs industriels)	5 échantillons	moyenne : 0,8-3,6 mg/m ³ étendue : 0,6-3,6	

Fibres céramiques

Production	31 échantillons 2 usines	moyenne : 3,8-12,9 mg/m ³ étendue : 0,2-26,3	
Application	23 échantillons 5 usines	moyenne : 1,0-15,5 mg/m ³ étendue : 0,7-22,9	

Microfibres de verre

Fabrication de filtres	33 échantillons 4 usines	moyenne : 0,4-1,4 mg/m ³ étendue : 0,07-4,3	
Isolation en aéronautique	17 échantillons 2 usines	moyenne : 1,4-4,0 mg/m ³ étendue : 0,3-6,2	

ESMEN *et al.* (1982)

Isolation de bâtiments	moyenne : 2,46 mg/m ³ étendue : 1,35-4,29	Valeurs pondérées sur 8 heures Concentrations en particules totales
Isolation de combles		
- Soufflage de laine de verre en vrac	moyenne : 7,68 mg/m ³ étendue : 4,31-9,69	
- Soufflage de laine de roche/laitier en vrac	moyenne : 15,35 mg/m ³ étendue : 2,66-49,7	

Tableau 2-13 Concentrations pondérales en poussières dans l'industrie de production et chez les utilisateurs de FVS (suite)

LEES <i>et al.</i> (1993)			
Isolation de résidences	268 échantillons	<i>Moyennes pondérées sur le temps :</i> moyenne : 0,75-5,58 mg/m ³ étendue : 0,01-9,71 <i>Moyennes pondérées sur la durée de la tâche :</i> moyenne : 2,18-12,2 mg/m ³ étendue : 0,05-46,5	Prélèvements sur 5 à 161 minutes
JAFFREY (1990)			
Isolation de combles	11 échantillons individuels	moyenne : 15 mg/m ³ étendue : 2,12-28,5	Prélèvements sur 30 minutes
	10 échantillons statiques	étendue : 0,3-6,2 mg/m ³	L'examen en MET montre que la plupart des particules dans les échantillons statiques sont non fibreuses
BURGE <i>et al.</i> (1995)			
Fibres céramiques			
Production primaire	7 usines européennes	moyenne : 1,7-3,4 mg/m ³	Prélèvements réalisés sur une période de travail complète
Production secondaire		moyenne : 11,8-11,2 mg/m ³	Mesure de la concentration en poussières <i>inspirables</i>
GANTNER (1986)			
Fibres céramiques		Poussières respirables	Prélèvements individuels et statiques
Retrait d'isolation de fours industriels	9 échantillons individuels	moyenne ± SD : 4,99 ± 6,68 mg/m ³ étendue : 0,12-16,9	Les échantillons contiennent 0 à 21 % en poids de cristobalite
	3 échantillons statiques	moyenne ± SD : 1,6 ± 1,58 mg/m ³ étendue : 0,1-3,4	
STRÜBEL ET FAUL (1994)			
Fibres céramiques			
Assemblage d'isolation de fours industriels	10 échantillons	médiane : 5,92 mg/m ³ étendue : 1,22-53,35	Échantillons individuels et statiques
Réparation et démolition d'isolation de fours industriels	4 échantillons	médiane : 9,18 mg/m ³ étendue : 0,38-14,98	Fibres vieilles en place depuis 2 ans
Autres travaux	7 échantillons	médiane : 0,65 mg/m ³ étendue : 0,16-3,21	

de corrélation entre la concentration en fibres et la concentration pondérale en poussières pour les échantillons individuels. Une relation grossière se dessine lorsque l'on regroupe les résultats des deux types de mesure par usine, par type d'activité et par type de fibre. Head et Wagg (1980) montrent que pour les laines d'isolations (laine de verre et de roche/laitier) avec un diamètre moyen supérieur à 3 μm , des concentrations pondérales élevées correspondent à des concentrations en fibres respirables relativement basses, alors que des concentrations en fibres élevées correspondent à des concentrations pondérales basses pour les microfibres de verre. Les résultats obtenus avec les fibres céramiques réfractaires se situent entre ces deux extrêmes.

Schneider et Breum (1987) ont proposé d'intégrer les mesures pondérales dans une méthode de *screening* en hygiène industrielle, qui permettrait de limiter le nombre d'échantillons pour lesquels un comptage de fibres devrait être effectué. D'après les auteurs, cette approche est valable pour autant que les SLV (*screening limit values*) soient testées avant leur utilisation ou lors de changement des conditions de production.

RÉFÉRENCES

AFNOR. Norme X43-050. Qualité de l'air. Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission - Méthode indirecte. Association française de normalisation, Paris, 1996

AFNOR. Norme X43-269 : Qualité de l'air. Air des lieux de travail. Détermination de la concentration en nombre de fibres par microscopie optique en contraste de phase - Méthode du filtre membrane. Association française de normalisation, Paris, 1991

ANTONSSON AB, RUNMARK S. Airborne fibrous glass and dust originating from worked reinforced plastics. *Am Ind Hyg Assoc J* 1987 **48** : 684-687

BREYSSE PN, CHERRIE JW, LEES PS J, BROWN P. Comparison of NIOSH 7400 « B » rules and WHO reference methods for the evaluation of airborne man-made mineral fibers. *Ann Occup Hyg* 1994 **38** (Suppl. 1) : 527-531

BREYSSE PN, RICE C, AUBOURG A, KOMORSKI MF, KALINOWSKI M, VERSEN R *et al.* Cowl rinsing procedure for airborne fiber sampling. *Appl Occup Environ Hyg* 1990 **5** : 619-622

BURGE PS, CALVERT IA, TRETOWAN WN, HARRINGTON JM. Are the respiratory health effects found in manufacturers of ceramic fibres due to the dust rather than the exposure to fibres ? *Occup Environ Med* 1995 **52** : 105-109

CHENG RT, McDERMOTT HJ, GIA GM, COVER TL, DUDA MM. Exposures to refractory ceramic fibers in refineries and chemical plants. *Appl Occup Environ Hyg* 1992 **7** : 361-367

CHERRIE J, DODGSON J, GROAT S, MACLAREN W. Environmental surveys in the European man-made mineral fiber production industry. *Scand J Work Environ Health* 1986 **12** (Suppl. 1) : 18-25

CHERRIE J, DODGSON J. Past exposures to airborne fibers and other potential risk factors in the European man-made mineral fiber production industry. *Scand J Work Environ Health* 1986 12 (Suppl. 1) : 26-33

CHERRIE J, JOHNSTON A. Letter to the Editor (Robbins *et al.* (1990)). « Comparison of size characteristics of fibers found on sample filters and cassette cowl from personal samples of man made mineral fibers ». *Appl Occup Environ Hyg* 1993 8 : 817

CHERRIE J, KRANTZ S, SCHNEIDER T, OHBERG I, KAMSTRUP O, LINANDER W. An experimental simulation of an early rockwool/slagwool production process. *Ann Occup Hyg* 1987 31 : 583-593

CORN M. An overview of inorganic man-made fibers in man's environment. In : R Lemen, JM Dement (Eds.) : *Dust and disease*. Park Forest South, Illinois, Pathotox Publish., 1979, pp. 23-36

CORN M, HAMMAD Y, WHITTER D, KOSTKO N. Employee exposure to airborne fiber and total particulate matter in two mineral wool facilities. *Environ Res* 1976 12 : 59-74

CORN M, SANSONE EB. Determination of total suspended matter and airborne fiber concentrations at three fibrous glass manufacturing facilities. *Environ Res* 1974 8 : 37-52

CORNETT MJ, RICE C, HERTZBERG VS, LOCKEY JE. Assessment of fiber deposition on the conductive sampling cowl in the refractory ceramic fiber industry. *Appl Ind Hyg* 1989 4 : 201-204

CRAWFORD NP, KELLO D, JARVISALO JO. Monitoring and evaluating man-made mineral fibers : work of a WHO/EURO reference scheme. *Ann Occup Hyg* 1987 31 : 557-565

DEMENT JM. Environmental aspects of fibrous glass production and utilization. *Environ Res* 1975 9 : 295-312

DODGSON J, CHERRIE J, GROAT S. Estimates of past exposure to respirable man-made mineral fibers in the European insulation wool industry. *Ann Occup Hyg* 1987 31 : 567-582

DYSON DJ, BUTLER MA, HUGHES RJ, FISHER R, HICKS GW. The de-vitrification of alumino-silicate ceramic fiber materials - The kinetics of the formation of different crystalline phases. *Ann Occup Hyg* 1997 41 : 561-590

ESMEN NA. Short-term survey of airborne fibers in US manufacturing plants. In : *Biological effects of man-made mineral fibres*. Proc. of a WHO/IARC Conference, Copenhagen, Denmark, 20-22 April 1982. Copenhagen, World Health Organization, Regional Office for Europe, Vol. 1, 1984, pp. 65-82

ESMEN NA, CORN M, HAMMAD YY, WHITTIER D, KOTSKO N, HALLER M, KAHN RA. Exposure of employees to man-made mineral fibers : ceramic fiber production. *Environ Res* 1979 19 : 265-278

ESMEN N, CORN M, HAMMAD Y, WHITTIER D, KOTSKO N. Summary of measurements of employee exposure to airborne dust and fiber in sixteen facilities producing man-made mineral fibers. *Am Ind Hyg Assoc J* 1979 40 : 108-117

ESMEN N, HAMMAD Y, CORN M, WHITTIER D, KOTSKO N, HALLER M, KAHN RA. Exposure of employees to man-made mineral fibers : mineral wool production. *Environ Res* 1978 15 : 262-277

ESMEN NA, SHEEHAN MJ, CORN M, ENGEL M, KOTSKO N. Exposure of employees to man-made vitreous fibers : installation of insulation materials. *Environ Res* 1982 **28** : 386-398

ESMEN NA, WHITTIER D, KAHN RA, LEE TC, SHEEHAN M, KOTSKO N. Entrainment of fibers from air filters. *Environ Res* 1980 **22** : 450-465

ESMEN NA, ERDAL S. Human occupational and nonoccupational exposure to fibers. *Environ Health Perspect* 1990 **88** : 277-286

FOWLER DP, BLAZER JL, COOPER WC. Exposure of insulation workers to airborne fibrous glass. *Am Ind Hyg Assoc J* 1971 **32** : 86-91

FRIAR JJ, PHILLIPS AM. Exposure to ceramic man-made mineral fibers. In J Bignon, J Peto, R Saracci (Eds) : *Non occupational exposure to mineral fibers*. IARC Scientific Publications, Lyon, 1989 **90**, pp. 299-303

GANTNER BA. Respiratory hazard from removal of ceramic fiber insulation from high temperature industrial furnaces. *Am Ind Hyg Assoc J* 1986 **47** : 530-534

GAUDICHET A, PETIT G, BILLON-GALLAND MA, DUFOUR G. Levels of atmospheric pollution by man-made mineral fibres in buildings. In J Bignon, J Peto, R Saracci (Eds) : *Non occupational exposure to mineral fibres*. IARC Scientific Publications, Lyon, 1989 **90**, pp. 291-298

GIBBS GW, HWANG CY. Dimensions of airborne asbestos fibers. In JC Wagner (Ed) : *Biological effects of mineral fibers*. IARC Scientific Publications, Lyon, 1980 **30**, pp. 69-77

HALL GS, RICE CH, LOCKEY JE, LEMASTERS GK, GARTSIDE PS. A comparison of exposures to refractory ceramic fibers over multiple work shifts. *Ann Occup Hyg* 1997 **41** : 555-560

HAMMAD YY, ESMEN NA. Long-term survey of airborne fibres in the United States. In : *Biological effects of man-made mineral fibers*. Proc. of a WHO/IARC Conference, Copenhagen, Denmark, 20-22 April 1982. Copenhagen, World Health Organization, Regional Office for Europe, Vol. 1, 1984, pp. 118-132

HEAD IWH, WAGG RM. A survey of occupational exposure to man-made mineral fibre dust. *Ann Occup Hyg* 1980 **23** : 235-258

HORI H, HIGASHI T, FUJINO A, YAMATO H, ISHIMATSU S, OYABU T. Measurement of airborne ceramic fibres in manufacturing and processing factories. *Ann Occup Hyg* 1993 **37** : 623-629

HSC. Man-made mineral fibers (Report of a Working Party to the Advisory Committee on Toxic Substances). London, Health and Safety Commission 1979, 36 p.

HSE. MDHS 39/3. Asbestos fibers in air. Light microscope methods for use with the control of asbestos at work regulations. *Health and Safety Executive* 1990

IARC. Monograph on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. Vol. 43. *Man-Made Fibers and Radon*. Lyon, International Agency for Research on Cancer 1988

INDULSKI J, GOSCICKI J, WIECEK E, STROSZEJN-MROWCA G. The evaluation of occupational exposure of workers to airborne MMMF in Poland. In : *Biological effects of*

man-made mineral fibres. Proc. of a WHO/IARC Conference, Copenhagen, Denmark, 20-22 April 1982. Copenhagen, World Health Organization, Regional Office for Europe, Vol. 1, 1984, pp. 191-197

IPCS-WHO. Environmental Health Criteria 77 : *Man-made Mineral Fibers*. Geneva, World Health Organization, 1988

ISO. Method ISO/DIS 8672. Determination of the number concentration of airborne inorganic fibers by phase contrast optical microscopy - Membrane filter method. International Organization for Standardization, 1988

JACOB TR, HADLEY JG, BENDER JR, EASTES W. Airborne glassfiber concentrations during installation of residential insulation. *Am Ind Hyg Assoc J* 1992 53 : 519-523

JAFFREY SAMT. Levels of airborne man-made mineral fibers in U.K. dwellings. I-Fiber levels during and after installation of insulation. *Atmos Environ* 1990 24 : 133-141

JAFFREY SAMT, ROOD AP, LLEWELLYN JW, WILSON AJ. Levels of airborne man-made mineral fibers in UK dwellings : II-Fiber levels during and after some disturbance of loft insulation. *Atmos Environ* 1990 24 : 143-146

JULLIER F, TIESLER H, ZINDLER G. Messung der Faserstaubkonzentration beim Umgang mit Mineralwolle-Isolierungen auf industriellen Baustellen. *Staub Reinhalt Luft* 1993 53 : 245-250

KAUFFER E, BARAT F, CERTIN JF, LAUREILLARD J, VIGNERON JC. Matériaux isolants formés de fibres minérales artificielles - Niveaux d'empoussièrement et mesures de prévention lors de la pose. *INRS, Cahier de notes documentaires* 1993 150 : 25-31

KAUFFER E, SCHNEIDER T, VIGNERON JC. Assessment of man-made mineral fibre size distributions by scanning electron microscopy. *Ann Occup Hyg* 1993 37 : 469-479

KAUFFER E, VIGNERON JC, VEISSIÈRE S. Enquête épidémiologique dans deux usines productrices de fibres minérales artificielles. I. Mesure des niveaux d'empoussièrement. *Arch Mal Prof* 1987 48 : 1-6

KAUFFER E, VIGNERON JC, VEISSIÈRE S. Matériaux fibreux. Caractéristiques des niveaux de pollution. *INRS, Cahier de notes documentaires* 1990 141 : 817-823

KONZEN JL. Results of environmental air-sampling studies conducted in Owens Corning fiberglass manufacturing plants. In : *Occupational Exposure to Fibrous Glass*. Proc. of a Symposium. College Park, Maryland, 26-27 June 1974, pp. 115-129

KRANTZ S. Exposure to man-made mineral fibers at ten production plants in Sweden. *Scand J Work Environ Health* 1988 14 (Suppl. 1) : 49-51

KRANTZ S, CHERRIE J, SCHNEIDER T, ÖHBERG I, KAMSTRUP O. Modelling past exposure to MMMF in the European rock/slag wool industry. Stockholm : Arbetsarkiv, 1991 : 1-42. *Arbete & Hälsa* 1991 : 1

LEES PSJ, BREYSE PN, MCARTHUR BR, MILLER ME, ROONEY BC, ROBBINS CA *et al.* End-user exposures to man-made vitreous fibers : I. Installation of residential insulation products. *Appl Occup Hyg* 1993 8 : 1022-1030

MARCONI A, CORRADETTI E, MANNOZZI A. Concentrations of man-made vitreous fibers during installation of insulation materials aboard ships at Ancona naval dockyards. *Ann Occup Hyg* 1987 31 : 595-599

MARTINON L, BILLON-GALLAND MA, VALLENTIN F, BROCHARD P. Contribution à l'étude de l'exposition des citadins aux particules atmosphériques inhalables : Etude qualitative et quantitative de la pollution de fond urbaine par les fibres d'amiante et par les fibres minérales synthétiques. LEPI, Paris. Contrat de recherche du Ministère de l'Environnement (N° de convention 93131), 1996

MCCRONE WC. *The asbestos particle atlas*. Ann Arbor Sci. Publ. Inc, Ann Arbor, MI, 1980, 122 p.

MILLER ME, LEES PSJ, BREYSSE P.N. A comparison of airborne man-made vitreous fiber concentrations before and after instalation of insulation in new construction housing. *Appl Occup Environ Hyg* 1995 10 : 182-187

NIOSH. Fibers, Method 7400, Revision 3. In : *NIOSH manual of analytical methods*. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH, 1987

NIOSH. Fibers, Method 7400, Revision 2. In : *NIOSH manual of analytical methods*. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH, 1987

OHBERG I. Technological development of the mineral wool industry in Europe. *Ann Occup Hyg* 1987 31 : 529-545

OTTERY J, CHERRIE JW, DODGSON J, HARRISON GE. A summary report on environmental conditions at 13 European MMMF plants. In : *Biological effects of man-made mineral fibers*. Proc. of a WHO/IARC Conference, Copenhagen, Denmark, 20-22 april 1982. World Health Organization, Regional office for Europe, Copenhagen, 1984 1 : 83-117

PLATO N, KRANTZ S, GUSTAVSSON P, SMITH TJ, WESTERHOLM P. Fiber exposure assessment in the Swedish rock wool and slag wool production industry in 1938 - 1990. *Scand J Work Environ Health* 1995 21 : 345-352

REIDIGER G. Measurements of mineral fibers in the industries which produce and use MMMF. In : *Biological effects of man-made mineral fibers*. Proc. of a WHO/IARC Conference, Copenhagen, Denmark, 20-22 April 1982. World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Vol. 1, 1984, pp. 133-177

RICE CH, LOCKEY JE, LEMASTERS GK, LEVIN LL, STALEY P, HANSEN KR. Estimation of historical and current employee exposure to refractory ceramic fibers during manufacturing and related operations. *Appl Occup Environ Hyg* 1997 12 : 54-61

ROBBINS CA, BREYSSE PN, FRANCIS M, LEES PJS, CHOPRA N, CORN M. Comparison of size characteristics of fibers found on sample filters and cassette cowl from personal samples of airborne man-made mineral fibers. *Appl Occup Environ Hyg* 1992 7 : 659-664

ROOD AP. Size distribution of airborne ceramic fibers as determined by transmission electron microscopy. *Ann Occup Hyg* 1988 32 : 237-240

ROOD AP, STREETER RR. Size distribution of airborne superfine man-made mineral fibers determined by transmission electron microscopy. *Am Ind Hyg Assoc J* 1985 46 : 257-261

SAHLE W, LASZLO I. Airborne inorganic fiber level monitoring by transmission electron microscope (TEM) : comparison of direct and indirect sample transfer methods. *Ann Occup Hyg* 1996 40 : 29-44

SARACCI R, SIMONATO L, ACHESON ED, ANDERSEN A, BERTAZZI PA, CLAUDE J *et al.* Mortality and incidence of cancer of workers in the man made vitreous fibers producing industry : an international investigation at 13 European plants. *Br J Ind Med* 1984 **41** : 425-436

SCHNEIDER T. Exposure to man-made mineral fibers in user industries in Scandinavia. *Ann Occup Hyg* 1979 **22** : 153-162

SCHNEIDER T. Exposure levels during the use of synthetic mineral fibers (SMF). *J Occup Health Safety - Aust NZ* 1996 **12** : 289-296

SCHNEIDER T, BURDETT G, MARTINON L, BROCHARD P, GUILLEMIN M, TEICHERT U, DRAEGER U. Ubiquitous fiber exposure in selected sampling sites in Europe. *Scand J Work Environ Health* 1996 **22** : 274-284

SCHNEIDER T, HUSEMOEN T, OLSEN E, CHRISTENSEN V, KAMSTRUP O. Airborne fibre concentration during standardized building insulation with bonded man-made vitreous fibre insulation material having different nominal diameters and oil content. *Ann Occup Hyg* 1993 **37** : 631-644

SCHNEIDER T, NIELSEN O, BREDSDORFF P, LINDE P. Dust in buildings with man-made mineral fiber ceiling boards. *Scand J Work Environ Health* 1990 **16** : 434-439

SHEEHAN MJ, REYNOLDS JW. Airborne asbestos analysis of low fiber density samples : a comparison of the A and B counting rules of the NIOSH method 7400. *Appl Occup Environ Hyg* 1992 **7** : 38-41

SIMONATO L, FLETCHER AC, CHERRIE JW, ANDERSEN A, BERTAZZI P *et al.* The International Agency for Research on Cancer historical cohort study of MMMF production workers in seven european countries : extension of the follow-up. *Ann Occup Hyg* 1987 **31** : 603-623

STRUBEL G, FAUL L. Pollutant load caused by ceramic fibers and new results about their behaviour of recrystallization. *Ann Occup Hyg* 1994 **38** (Suppl. 1) : 713-722

SWITALA ED, HARLAN RC, SCHLAUDECKER DG, BENDER JR. Measurement of respirable glass and total fiber concentrations in the ambient air around a fiberglass wool manufacturing facility and a rural area. *Regul Toxicol Pharmacol* 1994 **20** : S76-S88

THRIENE B, SOBOTTKA A, WILLER H, WEIDHASE J. Man-made mineral fiber boards in buildings-health risks caused by quality deficiencies. *Toxicol Lett* 1996 **88** : 299-303

TIMA. Man-made vitreous fibers : Nomenclature, chemical and physical properties. 1991, Nomenclature committee of TIMA Inc. Eastes, W ed., Stamford, CT, Owens-Corning Fiberglass

TRETHOWAN WN, BURGE PS, ROSSITER CE, HARRINGTON JM, CALVERT IA. Study of the respiratory health of employees in seven european plants that manufacture ceramic fibres. *Occup Environ Med* 1995 **52** : 97-104

VAN DER WAL JF, EBENS R, TEMPELMAN J. Man-made mineral fibres in homes caused by thermal insulation. *Atmos Environ* 1987 **21** : 13-19

VDI. Indoor air pollution measurement. Measurement of inorganic fibrous particles. Measurement planning and procedure. Scanning electron microscopy. VDI 3492, part 2, 1994

WHO. Determination of airborne fiber number concentrations. A recommended method, by phase contrast optical microscopy (membrane filter method). World Health Organization, Copenhagen, 1997

WHO/EURO. Reference methods for measuring airborne man-made mineral fibers (MMMf). WHO Environmental Health Report 4. World Health Organisation, Regional Office for Europe, Copenhagen, 1985

Annexes

Dépôt des particules et des fibres inhalées dans les voies respiratoires

Le site de dépôt des particules inhalées et la quantité de particules déposées au niveau de l'organe cible sont des facteurs importants à prendre en considération dans l'étude des pathologies induites par les particules inhalées.

Le comportement des particules inhalées dans les voies respiratoires est généralement décrit en fonction de leur « diamètre aérodynamique équivalent ». Il correspond au diamètre d'une sphère de densité unitaire ayant la même vitesse de sédimentation (dépôt sous l'influence de la gravité) que la particule en question. Cette définition évite les complications dues aux différences de forme et de densité des particules. Pour les fibres, l'axe longitudinal ayant tendance à s'orienter parallèlement aux lignes de flux de l'air inspiré, le diamètre aérodynamique est en relation directe avec le diamètre de la section transversale de la fibre. Une approximation généralement admise pour les silicates fibreux, dont la densité est proche de celle des fibres d'asbeste, est : $\varnothing_{\text{aérodynamique}} \approx 3 \times \varnothing_{\text{physique}}$ (Timbrell 1965).

Les particules les plus petites ($\varnothing_{\text{physique}} \leq 0,5 \mu\text{m}$) sont sujettes à un mouvement brownien causé par l'impact répété des molécules gazeuses. Ce processus est appelé diffusion et est indépendant de la densité des particules. Il en résulte que le comportement des particules de $\varnothing_{\text{physique}} \leq 0,5 \mu\text{m}$ peut être décrit en utilisant leur diamètre physique.

Une fois en contact avec les parois humides des voies respiratoires, les particules sont irréversiblement éliminées du flux d'air inspiré et définitivement déposées dans les voies respiratoires. L'impaction résulte du fait qu'en raison de leur inertie, les particules ne suivent pas les lignes de flux de l'air lors de leur déflexion dans les courbes ou dans les bifurcations. L'impaction est prépondérante pour le dépôt des particules de $\varnothing_{\text{aérodynamique}} > 3 \mu\text{m}$ dans les zones naso-pharyngées et trachéo-bronchiques des voies respiratoires. La sédimentation (ou dépôt gravitationnel) résultant de l'action de la gravité sur les particules en suspension dans l'air est effective pour des particules de plus de $0,5 \mu\text{m}$. La probabilité pour qu'une particule soit déposée par sédimentation augmente avec son diamètre. Elle joue un rôle important pour le dépôt de

particules dans la partie distale des bronches et dans la zone alvéolaire du poumon. L'interception consiste en la rencontre « accidentelle » non liée à l'inertie d'une particule avec la paroi des voies respiratoires. Ce mécanisme est surtout important pour le dépôt des fibres. Il faut remarquer que le comportement des fibres tortueuses est différent de celui des fibres rectilignes, la courbure des premières ayant pour effet d'accroître leur diamètre aérodynamique effectif. Le dépôt des fibres par interception se fait de façon préférentielle au niveau des bifurcations des voies aériennes.

RÉFÉRENCES

- BRODY AR, ROE MW. Deposition pattern of inorganic particles at the alveolar level in the lungs of rats and mices. *Am Rev Respir Dis* 1983 **128** : 724-729
- MARTONEN TB, KATZ IM. Deposition pattern of aerosolized drugs within human lungs : effect of ventilatory parameters. *Pharm Res* 1993 **10** : 871-878
- PARKES WR. *Occupational lung disorders*, (2nd ed.) Butterworths, London, 1982, pp. 46-49
- RAABE OG. Deposition and clearance of inhaled particles. In BL Gee, WKC Morgan, Brooks JM (Eds.) : *Occupational lung disease*. Raven Press, NY, 1984, pp. 1-37
- TIMBRELL V. The inhalation of fibrous dusts. *Ann NY Acad Sci* 1965 **132** : 255-273

Exposition à la wollastonite

L'exposition professionnelle en milieu minier est connue pour deux des plus grands sites miniers au monde. En Finlande (mine de Lappenranta), la poussière respirable est essentiellement formée de calcite, avec 15 % de wollastonite et 2 à 3 % de quartz. Sur les sites d'exploitation et dans l'atelier de broyage, la concentration en fibres (mesurée optiquement) varie de 1 à 45 fibres/cm³. Des résultats comparables ont été obtenus aux États-Unis (mine de Willsboro).

Dans les usines de fabrication de fibrociment, quelques données d'exposition professionnelle disponibles indiquent 0,02 à 0,2 fibres/cm³.

L'exposition liée à la wollastonite à partir de produits en renfermant est difficile à étudier, dans la mesure où l'utilisation dans les matériaux composites a entraîné l'altération des caractères originaux de cette fibre.