

Métriologie des fibres d'amiante dans l'atmosphère : description et limites des techniques de mesurages utilisées

M.-A. BILLON-GALLAND (1), E. KAUFFER (2)

(1) Laboratoire d'étude des particules inhalées, 11, rue George Eastman, 75013 Paris.

(2) Institut national de recherche et de sécurité, BP n° 27, avenue de Bourgogne, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy.

SUMMARY

Measurement of the asbestos dust concentration in air. Description and limits of the methods.

Since the beginning of this century a wide range of methods were used to evaluate the asbestos exposure of workers. Instruments such as the konimeter, thermal precipitator, impinger or tyndallometer were employed to collect dust samples. Currently, the membrane filter method associated with phase contrast optical microscopy is widely accepted. These different sampling methods are presented in this paper and the relation-

ships between asbestos concentration recorded by means of methods used in the past and with the current membrane filter method or with direct-reading instruments are discussed. Emphasis is put on the difficulty to use such relationships which were often established for specific situations (in the mine industry for instance). For non occupational exposure the use of electron microscopy methods is evaluated.

Key-words : Asbestos. Dust. Monitoring.

RÉSUMÉ

Les méthodes utilisées pour mesurer l'empoussièrement en fibres d'amiantes des salariés ont beaucoup évolué depuis le début du siècle. C'est ainsi que des instruments aussi différents que le conimètre, le compteur à jet, le précipitateur thermique, l'impinger ou le tyndallomètre ont été utilisés pour effectuer les prélèvements avant d'arriver à la méthode actuelle où les fibres sont prélevées sur un filtre à membrane avec observation en microscopie optique à contraste de phase. Ces différentes méthodes sont discutées ainsi que les relations qui ont pu être

établies entre les méthodes anciennes, la méthode actuelle et les méthodes à lecture directe. L'accent est mis sur la difficulté d'utiliser ces relations qui ont souvent été établies pour des situations particulières (industrie minière par exemple). Pour ce qui est des évaluations extra professionnelles les avantages et inconvénients des techniques de microscopie électronique sont décrits.

Mots-clés : Amiante. Empoussièrement. Contrôle.

Il existe très peu de données quantitatives fiables sur les expositions à l'amiantes avant 1950, période où l'exposition était beaucoup plus importante que maintenant. De plus, les premières mesures proviennent des contrôles effectués dans les usines d'amiantes et évaluent la concentration en particules (millions de particules par pied cube ou particules par ml) sans faire de distinction entre les fibres et les particules non fibreuses. Les premières méthodes, et ce jusque dans les années 1960, sont variées et diffèrent d'un pays à l'autre.

Après 1950, le comptage des fibres était introduit mais sans coordination et ce n'est que vers 1960 que la méthode du filtre à membrane avec observation au microscope optique à contraste de phase (MOCP) commença à être utilisée. A partir de 1975, il y a eu standardisation de cette technique avec la définition d'une fibre et de la procédure de comptage. C'est cette méthode qui est encore utilisée en hygiène industrielle pour contrôler les empoussètements dans les établissements où le personnel est exposé aux poussières d'amiantes. Compte tenu de la granulométrie des fibres d'amiantes et notamment du diamètre moyen (0,03 micromètre) des fibrilles élémentaires de chrysotile,

Tirés à part : M.-A. BILLON-GALLAND, à l'adresse ci-dessus.

la microscopie électronique à transmission analytique s'est avérée mieux adaptée pour contrôler l'atmosphère ambiante à l'intérieur des locaux où il y a des matériaux de construction contenant de l'amiante et à l'extérieur à proximité des sources d'émissions ou des sources naturelles.

Dans le contexte d'études épidémiologiques visant à examiner les effets possibles sur la santé de l'exposition aux fibres, il est nécessaire d'estimer la dose de fibres inhalées sur des périodes pouvant aller jusqu'à 40 ans ou plus. La recherche de relations permettant de passer des résultats obtenus avec des techniques anciennes à ceux obtenus récemment est essentielle. La quasi-totalité des enquêtes épidémiologiques ayant été conduites sur les lieux de travail, l'accent sera mis sur les méthodes de mesurage utilisées en hygiène industrielle.

Les techniques de mesurages récentes

Elles ont été développées au début des années 70 et couvrent l'évaluation des expositions professionnelles en hygiène industrielle et l'évaluation des expositions extra professionnelles dans l'environnement. Schématiquement, le contrôle des atmosphères en hygiène industrielle et dans l'environnement est réalisé au moyen de prélèvement d'air sur membrane filtrante. L'échantillonnage le mieux adapté pour déterminer l'exposition des employés est le prélèvement individuel effectué dans la zone respiratoire avec observation de la membrane au microscope optique. Parallèlement, pendant cette période, des méthodes de mesure à lecture directe basées sur l'analyse de la lumière diffusée sont apparues. En ce qui concerne l'environnement, ce sont les techniques de microscopie électronique qui ont été privilégiées.

ÉVALUATIONS PROFESSIONNELLES

Méthode du filtre à membrane avec lecture en microscopie optique à contraste de phase

Le nombre de fibres prélevées sur le filtre est déterminé par comptage au microscope optique à contraste de phase. Les fibres comptées sont celles de longueur supérieure à 5 micromètres, de largeur inférieure à 3 micromètres et de rapport longueur/largeur supérieur à 3 : 1. Le comptage des fibres au-delà d'une certaine longueur permet de réduire la variabilité due aux limites du microscope optique, mais aussi de tenir compte du fait que les fibres les plus longues semblent les plus dangereuses [1]. La coupure à 3 micromètres en diamètre permet de séparer les fibres respirables des fibres non respirables, seules les premières étant susceptibles d'atteindre les alvéoles pulmonaires.

Cette méthode simple d'emploi et peu coûteuse présente un certain nombre de limites :

- elle n'est pas spécifique à l'amiante car elle ne permet pas de faire l'identification des fibres,
- les fibres les plus fines de diamètre inférieur à 0,2 micromètre ne sont pas visibles,
- des cristaux aciculaires ou des fragments de clivages sont également pris en compte dans le dénombrement s'ils ont les dimensions requises.

Depuis le début des années 70, cette méthode a évolué au fil des améliorations successives [2, 6]. Ces dernières ont particulièrement porté sur la standardisation du réticule utilisé pour le comptage et sur les techniques de transpiration de la membrane filtrante. Les têtes de prélèvement peuvent être utilisées avec un cylindre protecteur ou sans [6, 5]. Ce cylindre a pour but d'éviter les projections directes de particules sur le filtre, mais peut présenter l'inconvénient de favoriser le dépôt de fibres sur ses parois intérieures [7].

Dès 1976, une comparaison au niveau international des comptages obtenus par la méthode du filtre à membrane a été publiée [8]. Cette comparaison a impliqué des laboratoires expérimentés de 9 pays qui ont chacun fourni des filtres prélevés dans différentes situations industrielles. Dans cet essai, la moyenne des résultats obtenus par les différents laboratoires par comparaison à la moyenne générale se situe entre 0,57 et 1,95 pour les fibres de chrysotile et entre 0,83 et 1,23 pour les fibres d'amosite. Depuis, de nombreux autres circuits d'intercomparaison sont régulièrement organisés [9-13].

L'influence des améliorations successives introduites depuis le début de la mise en pratique de la méthode du filtre à membrane sur le résultat des comptages a été estimée par Rickard [14]. Approximativement, un doublement des comptages est ainsi mentionné pour chacune des évolutions suivantes : méthode de transpiration, standardisation du réticule et des règles de comptage, ainsi, les comptages actuels sont sensiblement plus élevés que ceux obtenus dans les années 70.

Méthodes de mesurage à lecture directe

Il existe un nombre important de méthodes utilisant des principes multiples pour la mesure instantanée des aérosols. Ces appareils, dont une revue bibliographique récente a été effectuée, sont en général appelés appareils à lecture directe ou appareils de mesure en continu [15]. Parmi ceux-ci, quelques-uns sont dédiés au mesurage de la concentration en nombre de fibres dans l'air. Avec le renforcement de la réglementation sur l'amiante, ces appareils semblent de plus en plus utilisés en France pour une évaluation rapide des niveaux de concentration.

Le mesurage automatique de la concentration en fibres dans l'air est basé sur l'analyse de la lumière diffusée par les particules. L'intensité de la lumière diffusée est donnée par la théorie de Mie pour les particules sphériques, qui a été étendue par Kerker au cas des particules cylindriques [16, 17]. Avant d'atteindre la cellule de mesurage, les fibres sont alignées. Pour des fibres conductrices, un alignement est obtenu sous l'action d'un champ électrique [18, 20]. Des fibres ayant une susceptibilité magnétique suffisante peuvent également être alignées sous l'action d'un champ magnétique [21]. Dans ce cas, les fibres sont alignées parallèlement ou perpendiculairement au champ bien que certaines fibres s'alignent suivant des directions intermédiaires. Enfin une géométrie particulière du conduit d'écoulement de l'air prélevé peut entraîner un alignement des fibres dans le sens du débit sous l'action des forces d'écoulement [22, 23].

De l'analyse de la littérature, il ressort que deux appareils ont été plus particulièrement testés. Le Vickers M 88 basé sur un alignement magnétique des fibres ne semble plus commercialisé actuellement. Les mesures effectuées avec cet appareil ont montré une bonne corrélation avec les comptages visuels pour les prélèvements effectués dans l'amiante textile et une corrélation satisfaisante dans le secteur des garnitures de frein [24]. Des étalonnages sont nécessaires pour chaque variété de fibres [25]. L'autre appareil est le FAM (*Fiber Aerosol Monitor*) qui a été développé par le NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) en collaboration avec l'EPA (*Environmental Protection Agency*) et le Bureau des Mines Américain [26]. La version actuelle de l'appareil est le FM 7400 dont les versions les plus anciennes FAM-1 et FAM-2 ont été les plus étudiées. Les fibres sont alignées sous l'action d'un champ électrique. L'appareil a été testé par comparaison avec des comptages effectués par microscopie optique dans différentes situations (protection ou rénovation d'un flochage, ambiance dans un local floqué, usinage de garnitures de frein) [27]. Un accord raisonnable a été trouvé entre les deux méthodes, spécialement pour des concentrations élevées. Une moins bonne corrélation a été mise en évidence dans une usine d'amiante ciment. L'étalonnage de l'appareil est réalisé en usine sur des fibres d'amosite. Si l'aérosol étudié est constitué de fibres de chrysotile, la réponse de l'appareil est satisfaisante, elle est moins bonne lorsqu'il s'agit de crocidolite [28]. Une troisième étude est plus critique. Le jugement porté sur des comparaisons effectuées en laboratoire est bon, mais plus nuancé pour des études de terrain [29]. D'autres auteurs enfin recommandent l'utilisation du FAM-1 comme méthode de *screening* pour l'évaluation de la concentration en fibres d'amiante [30].

Par ailleurs, on manque de données sur la variabilité attendue lors de l'utilisation simultanée de plusieurs appa-

reils du même type. Il est ainsi souhaitable, avant toute utilisation, de situer la réponse de ces appareils par rapport à la méthode du filtre à membrane pour le type de fibre que l'on veut mesurer. Ces appareils ne peuvent pas se substituer à la méthode conventionnelle du filtre à membrane pour vérifier le respect des valeurs limites.

ÉVALUATIONS EXTRAPROFESSIONNELLES

Microscopie électronique à transmission

L'échantillonnage est réalisé au moyen de prélèvement d'air d'ambiance sur une membrane filtrante. Les fibres d'amiante sont identifiées par cette méthode sur la base de leurs critères morphologiques, cristallographiques — par microdiffraction électronique — et chimiques par microanalyse à l'aide d'un spectromètre dispersif en énergie de rayons X couplé au microscope électronique. Seules les fibres d'amiante dont la longueur est supérieure à 5 micromètres, la largeur inférieure à 3 micromètres et le rapport longueur/largeur supérieur à 3 : 1 sont comptées.

La microscopie électronique à transmission est une méthode beaucoup plus sensible que celles utilisées pour les évaluations professionnelles du fait de sa haute résolution qui permet l'observation d'objets bien inférieurs à 0,01 micromètre de diamètre. Elle est considérée comme étant la méthode la mieux adaptée et la plus spécifique pour identifier de façon définitive les fibres d'amiante dans l'air. Elle est utilisée en France depuis 1996 de façon réglementaire, pour effectuer les diagnostics et mesurer les niveaux d'empoussièrement dans les immeubles bâtis avec des matériaux contenant de l'amiante et en fin de travaux après enlèvement ou recouvrement de l'amiante en place [31]. Les niveaux d'empoussièrement sont comparés à la valeur de 5 fibres par litre au-dessus de laquelle on considère qu'il y a une dégradation des matériaux contenant de l'amiante. Cette valeur de référence a été établie par rapport au fond général de pollution extérieure par l'amiante à Paris [32].

Microscopie électronique à balayage

L'échantillonnage est réalisé au moyen de prélèvement d'air d'ambiance sur une membrane filtrante comme pour la microscopie électronique à transmission. L'identification des fibres d'amiante est basée essentiellement sur leur morphologie et l'analyse chimique par spectrométrie dispersive en énergie de rayons X. La résolution de cette méthode reste en routine équivalente à la microscopie optique à contraste de phase qui est voisine de 0,2 micromètre [33]. Certains appareils peuvent, à forts grossissements atteindre des résolutions qui permettraient de détecter les fibres d'amiante les plus fines, cependant, les conditions nécessaires pour obtenir une bonne image augmentent de manière notable les temps d'observation. Dif-

férentes approches ont été utilisées pour analyser les fibres d'amiante dans des prélèvements d'air par microscopie électronique à balayage, technique moins coûteuse et plus simple au niveau de la préparation que la microscopie électronique à transmission. Elle est utilisée en Allemagne et en Suisse pour mesurer la pollution de l'air ambiant à l'intérieur des locaux avec des valeurs de référence différentes de celles de la France.

Techniques de mesurages anciennes

Pour certaines, elles ont été utilisées dès le début des années 20 jusqu'à la fin des années 70 pour mesurer les expositions professionnelles. La décennie 70 recouvre une période où les méthodes les plus anciennes et les méthodes récentes coexistaient.

CONIMÈTRE ET COMPTEUR À JET

Le conimètre est basé sur le principe d'impaction par inertie sur des plaques de verre recouvertes d'un film adhésif des particules situées dans un flux d'air à grande vitesse. L'air est aspiré au travers d'un orifice circulaire de 0,5mm de diamètre. La poussière déposée peut-être observée avec un microscope optique. Parmi les limitations de cet appareil, on peut citer la sous-estimation des particules fines et la destruction possible des agrégats de particules à cause de la vitesse très élevée du jet d'air (50-100 m/s) [34].

Le compteur à jet Owens est similaire dans son principe au conimètre à la différence que l'air est aspiré à travers une fente à une vitesse élevée (200 m/s). De plus la présence d'un humidificateur d'air incorporé permet la condensation d'eau sur les particules ce qui a pour effet d'augmenter l'efficacité de déposition et de ne plus rendre nécessaire le recouvrement de la plaque d'impaction.

PRÉCIPITATEUR THERMIQUE

Plusieurs types de précipitateurs thermiques ont été utilisés, mais tous sont basés sur le même principe. Quand un fil chaud est placé dans une atmosphère empoussiérée, les particules sont repoussées. Il est ensuite possible de les collecter sur des lames de microscopie faisant office de source froide. Les fibres sont dénombrées par comptage au microscope optique, la matière organique pouvant être retirée préalablement par calcination. Par rapport aux dispositifs où le recueil des particules se fait par impaction ou piégeage, cet appareil présente l'avantage d'avoir une efficacité de captage de l'ordre de 100 % pour les petites particules.

IMPINGER

L'impinger qui a été développé aux États-Unis est un instrument dans lequel les particules aspirées sont piégées

dans un milieu liquide. Les particules sont comptées au microscope optique dans une cellule de verre d'un millimètre de profondeur. Les suspensions obtenues peuvent être diluées pour obtenir une densité de particules observable, ce qui donne beaucoup de flexibilité au niveau des temps de prélèvement et des niveaux de concentration mesurables [4]. En principe, toutes les particules sont comptées et les résultats sont exprimés en millions de particules par pied cube (mppcf).

AUTRES APPAREILS

Parmi les autres appareils qui ont pu être utilisés, on peut citer le tyndallomètre qui à partir de l'intensité de la lumière diffusée estime la concentration volumique de poussières, des calibrations ultérieures permettant d'évaluer les concentrations massiques ou les concentrations en nombre de fibres. L'appareil VC25 a été utilisé principalement en Allemagne pour la mesure de la concentration pondérale des poussières recueillies sur un filtre, les poussières fines pouvant être séparées des poussières de plus grande dimension. En France un appareil similaire, l'ARM, mais ne permettant pas la sélection des particules en fonction de leur taille a été longtemps utilisé pour mesurer les concentrations gravimétriques.

Relations entre mesures anciennes et mesures récentes pour l'évaluation des expositions professionnelles

L'étude des maladies à temps de latence élevé (asbestose, cancer bronchique, mésothéliome) repose sur l'étude de cohortes anciennes au sein desquelles les mesures d'exposition, quand elles existent, ont été faites avec des méthodes qui diffèrent de celles d'aujourd'hui. La recherche de relation permettant de convertir les résultats obtenus à des époques différentes a fait l'objet de quelques publications. On distinguera les relations reliant les données actuelles à celles exprimées en millions de particules par pied cube de celles reliant les résultats exprimés en fibres/ml par différentes techniques.

CONVERSION ENTRE LES RÉSULTATS EXPRIMÉS EN FIBRES/ML ET EN MILLION DE PARTICULES PAR PIED CUBE

Il est très difficile d'obtenir des facteurs de conversion fiables à partir de comptages qui ne sont pas spécifiques de la concentration en fibres. Ce serait la même chose avec des mesures gravimétriques car les fibres peuvent représenter une proportion extrêmement variable de l'ensemble des poussières pour différents secteurs industriels (mines, moulins, textile, matériel de friction et amiante ciment).

Lynch *et coll.* ont obtenu en 1970 des rapports moyens (f/ml/mppcf) sur des séries de 100 à 500 prélèvements de 5,9 pour l'industrie textile, de 2,2 pour la fabrication de produits de friction et de 1,9 pour la fabrication de tuyaux [1]. Ce dernier rapport est signalé comme non statistiquement significatif, malgré la centaine de prélèvements apparés réalisés pour l'obtenir.

Robock *et coll.* ont montré qu'il n'existe pas de relation simple. Tandis que les rapports des moyennes calculées (f/ml/mppcf) provenant de plusieurs industries varient seulement de 3 à 8, ils sont très variables à l'intérieur de chaque industrie [35]. Ainsi, dans le textile, le rapport déterminé expérimentalement varie de 1,6 à 11,6 et dans les mines entre 0,5 et 47,4.

Comme on peut le constater, il existe une grande variabilité dans les facteurs de corrections proposés ; aussi, Esmen et Erdal ont considéré que ces facteurs ne peuvent donner que des estimations très générales des niveaux d'exposition avec une possibilité d'erreur d'un ordre de grandeur [36].

RELATION ENTRE LES RÉSULTATS EXPRIMÉS EN F/ML AR DIFFÉRENTES TECHNIQUES

Du Toit a comparé en 1977 les résultats obtenus avec le conimètre et le précipitateur thermique sur une période allant de 1940 à 1967, essentiellement dans des mines ou moulins d'Afrique du Sud [37]. Les comparaisons portaient sur des concentrations en fibres ou en fibres et particules. Malgré ces variations dans les conditions expérimentales, ces essais montrent que les résultats obtenus avec les deux appareils sont en bon accord.

Dans une autre étude, Du Toit et Gilfillan font état d'une série de comparaison réalisée entre la méthode du filtre à membrane, le précipitateur thermique et le conimètre dans huit mines d'Afrique du Sud où les quatre principales variétés d'amiantes étaient représentées [38]. De cette étude très détaillée il ressort que la concordance des résultats obtenus avec le précipitateur thermique et le conimètre est confirmée mais que ces relations dépendent du type d'amiantes présent. D'autre part les auteurs estiment que malgré une dispersion importante de résultats, les mesures effectuées par le conimètre ou le précipitateur thermique peuvent être reliées à celles obtenues par la méthode du filtre à membrane.

En 1983, Du Toit *et coll.* étendent l'étude précédente à deux nouveaux appareils, le VC25 et le tyndallomètre [39]. Quatorze droites de régression permettant d'établir des relations entre ces méthodes sont données pour différentes situations de comptage (particules, fibres courtes, fibres longues). Dans une ultime synthèse ils proposent les relations suivantes :

— 2 f/ml (conimètre) = 1,6 f/ml (précipitateur thermique) ;

— 2 f/ml (précipitateur thermique) = 2 f/ml (méthode du filtre à membrane) ;

— 2 f/ml (conimètre) = 1,3 f/ml (méthode du filtre à membrane) ;

Les auteurs soulignent que ces facteurs ne sont toutefois pas représentatifs des conditions moyennes prévalant dans l'industrie.

Récemment, dans une étude originale, Burdett a pu réutiliser en 1998 le matériel utilisé pour évaluer les expositions dans une usine britannique en 1938 [40]. Les prélèvements étaient effectués avec un précipitateur thermique et les comptages réalisés en microscopie optique à un grossissement de $\times 2\ 000$, en utilisant un objectif à immersion d'huile. L'auteur a pu reconstituer expérimentalement un aérosol de crocidolite dont les caractéristiques dimensionnelles étaient proches de l'aérosol d'origine. L'étude montre que les résultats reportés en 1938 étaient probablement entre 3 et 4 fois plus élevés que ceux qu'on obtiendrait actuellement, ceci étant essentiellement expliqué par des conditions d'observation différentes.

Conclusion

Les méthodes permettant d'évaluer les empoussièrtements sur les lieux de travail où les salariés sont exposés aux fibres ont beaucoup évolué depuis le début du siècle. De nombreuses techniques ont été mises en œuvre pour mesurer l'empoussièrement d'abord en nombre de particules puis de manière plus spécifique en nombre de fibres.

L'estimation des expositions passées reste un travail considérable à réaliser. Les facteurs de conversion permettant de relier les résultats obtenus avec les méthodes anciennes à ceux qui seraient obtenus avec la méthode actuelle qui ont été publiés l'ont été pour des situations de travail particulières, essentiellement en Afrique du Sud. La grande diversité des méthodes de prélèvement (précipitateur thermique, impinger, conimètre...) ainsi que des techniques de comptage (fond clair, fond noir, grossissement utilisé) ne permet pas d'établir de relations dont la validité pourrait être générale.

La reconstitution des expositions individuelles sur une vie entière nécessite que des mesures soient disponibles pour toute la carrière professionnelle et que ces données puissent être standardisées pour tenir compte des évolutions des techniques. A l'évidence, de telles situations sont peu fréquentes. Le travail réalisé par Burdett en 1998 est exemplaire, mais rares sont probablement les situations où une bonne documentation et la disposition d'un matériel à l'identique permettent d'effectuer un travail aussi précis [40].

En ce qui concerne les expositions professionnelles plus récentes, chez les utilisateurs de matériaux contenant de

l'amiante, elles sont actuellement renseignées dans la base de données EVALUTIL, qui prend en compte deux approches, d'une part les informations parues dans la littérature et d'autre part les observations du terrain. La variabilité des niveaux d'exposition observés pour une situation donnée est grande. Il est difficile d'utiliser ces résultats pour évaluer les expositions individuelles mais ils sont très utiles pour servir de base à l'établissement de matrices emploi-exposition [41].

Les mesures effectuées dans l'environnement ne sont pas utilisées pour les expositions individuelles, cependant, elles sont en plein essor depuis l'interdiction de l'amiante et le recensement des bâtiments.

Références

- LYNCH JR, AYER AE, JOHNSON DL : The interrelationships of selected asbestos exposure indices. *American Industrial Hygiene Association Journal*, September-October, 1970;598-604.
- ASBESTOS RESEARCH COUNCIL : The measurement of airborne asbestos dust by the membrane filter method. Technical note 1, Revised September 1971. *The asbestos Research Council, Rochdale*, 1971.
- AIHA-ACGIH : Aerosol hazards evaluation committee — Recommended procedures for sampling and counting asbestos fibres. *Am Ind Hyg Ass J* 1975;36:83-90.
- WALTON WH : The nature, hazards and assessment of occupational exposure to airborne asbestos dust. A Review. *Ann Occup Hyg* 1982;25:117-247.
- AFNOR : Détermination de la concentration en nombre de fibres par microscopie optique en contraste de phase — Méthode du filtre à membrane. *Norme X43-269*, 1991.
- WHO : Determination of airborne fibre number concentrations. A recommended method, by phase-contrast optical microscopy (membrane filter method). World Health Organisation, Geneva, 1997.
- 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;4:201-4.
- WALTON WH, ATTFIELD MD, BECKETT ST : An international comparison of counts of airborne asbestos fibres sampled on membrane filters. *Ann Occup Hyg* 1976;19:215-24.
- CARTON B, KAUFFER E, DERZKO G, GROSDEMANGE JP, JEANDEL B : Results of an asbestos counting trial performed in France in 1979. *Ann Occup Hyg* 1981;24:9-21.
- SCHLECHT PC, SHULMAN SA : Performance of asbestos fibre counting laboratories in the NIOSH proficiency analytical testing (PAT) program. *Am Ind Hyg Ass J* 1986;47:259-69.
- KAUFFER E : The French asbestos quality control scheme. In : Sixth International colloquium on dust measurement technique and strategy. Jersey. Channel Islands, 28-30 November 1989, Paris : *Asbestos International Association*, 1989;156-63.
- CRAWFORD NP, COWIE AJ, BROWN P : The RICE and AFRICA Schemes for asbestos fibre counting. *Ann Occup Hyg* 1992;36:59-70.
- ARROYO MC, ROJO JM : National versus international asbestos fibre counting schemes : Comparison between the Spanish Interlaboratory Quality Control Programme (PICC-FA) and the Asbestos Fibre Regular Informal Counting Arrangement (AFRICA). *Ann Occup Hyg* 1998;42:97-104.
- RICKARDS AL : Levels of workplace exposure : *Ann Occup Hyg* 1994;38:469-75.
- GÖRNER P, FABRIES JF : Techniques de mesure automatique des aérosols atmosphériques. *Cahiers de Notes Documentaires* 1990;140:595-626.
- MIE G : A contribution to the optics of turbid media, especially colloidal metallic suspensions. *Annales de Physique* 1908;25:377-445.
- KERKER M, MATIJEVIC E : Scattering of electromagnetic waves from concentric infinite cylinders. *J Optic Society Amer* 1961;51:506.
- LILIENTHAL P, ELTERMAN PB, BARON P : Development of a prototype fibrous aerosol monitor. *American Industrial Hygiene Association J* 1979;40:270-83.
- LILIENTHAL P : Light scattering from oscillating fibers at normal incidence. *J Aerosol Sci* 1987;18:389-400.
- CLUFF DL, PATTSAS AJ : Size characterisation of asbestos fibers by means of electrostatic alignment and light-scattering techniques. *Aerosol Science and Technology* 1992;17:186-98.
- TIMBRELL V : Alignment of respirable asbestos fibres by magnetic fields. *Ann Occup Hyg* 1975;18:299-311.
- PRODI V, DE ZAIACOMO T, HOCHRAINER D, SPURNY K : Fibre collection and measurement with the inertial spectrometer. *J Aerosol Sci* 1982;13:49-58.
- ROOD AP, WALKER EJ, MOORE D : Construction of a portable fiber monitor measuring the differential light scattering from aligned fibers. *Aerosol Science and Technology* 1992;17:1-8.
- JONES AD, GALE RW : Industrial trials with the Vickers M88 rapid asbestos fibre counter. *Ann Occup Hyg* 1982;25:39-51.
- DU TOIT RJJ : Vickers M.88 versus manual count. In *fourth international colloquium on dust measuring technique and strategy*, Edinburgh, September 1982;133-42.
- BARON PA : Measurement of asbestos and other fibers. In : PA Willeke K, Baron. *Aerosol measurement : Principles techniques and applications*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- DROZ PO : Some field experience with a fibrous aerosol monitor. In *fourth international colloquium on dust measuring technique and strategy*, Edinburgh, September 1982;199-208.
- LILIENTHAL P : Low Concentration Airborne Asbestos Monitoring with the GCA FAM-1. In : *Aerosols : Formation and Reactivity*. 2nd Int. Aerosol Conference Berlin, — Pergamon Journals Ltd. Printed in Great Britain, 1986;1020-3.
- ILES PJ, SHENTON-TAYLOR T : Comparison of a fibrous aerosol monitor (FAM) with the membrane filter method for measuring asbestos concentrations. *Ann Occup Hyg* 1986;30:77-87.
- PHANPRASIT W, ROSE VE, OESTENSTAD RK : Comparison of the fibrous aerosol monitor and the optical fiber count technique for asbestos measurement. *Appl Ind Hyg* 1988;3:28-33.
- AFNOR : Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission — Méthode indirecte. *Norme X43-050*, janvier 1996.
- SEBASTIEN P, BILLON-GALLAND MA, DUFOUR G, GAUDICHET

- A, BONNAUD G, BIGNON J : Levels of asbestos air pollution in some environmental situations — *Ann N Y Acad Sci* 1979;330:401-15.
33. KAUFFER E, SCHNEIDER T, VIGNERON JC : Assessment of man-made mineral fibre size distributions by scanning electron microscopy — *Ann Occup Hyg* 1993;37:469-79.
34. BECKETT ST : Monitoring and identification of airborne asbestos. In : L Michaels and SS Chissick. *Asbestos Properties Applications and Hazards*. Volume 1 Chichester, New York, Brisbane, Toronto, John Wiley and Sons, 1979;207-45.
35. ROBOCK K, ISSEROW LW, SELLES DJA : Asbestos and other natural mineral fibres. *Environmental Health Criteria*. World Health Organisation. Geneva, Switzerland, 1984;53-32.
36. ESMEN NA, ERDAL S : Human occupational and non occupational exposure to fibers. *Environ Health Perspect* 1990;88:277-86.
37. DU TOIT RSJ : Review of early results of comparative tests with the Koniometer and the thermal precipitator in asbestos mines. *Ann Occup Hyg* 1977;20:279-81.
38. DU TOIT RSJ, GILFILLAN TC : Simultaneous airborne dust samples with Koniometer, thermal precipitator and dosimeter in asbestos mines. *Ann Occup Hyg* 1977;20:333-40.
39. DU TOIT RSJ, ISSEROW LW, GILFILLAN TC, ROBOCK K, TEICHERT H : Relationships between simultaneous airborne dust samples taken with five types of instruments at South African asbestos mines and mills. *Ann Occup Hyg* 1983;27:373-87.
40. BURDETT G : A comparison of historic asbestos measurements using a thermal precipitator with the membrane filter : Phase contrast microscopy method. *Ann Occup Hyg* 1998;42:21-31.
41. ORLOWSKI E, CREAU Y, GAUDUCHEAU E *et al.* : EVALUTIL : Base de données pour l'évaluation des expositions à l'amiante des utilisateurs de matériaux en contenant — *Cahiers de Notes Documentaires*, 166, 1^{er} trimestre, 1997;5-16.