

3 MÉTROLOGIE	28
1. Les techniques de mesure d'aujourd'hui	29
1.1. Echantillonnage	29
1.2. Méthodes d'analyses	30
2. Méthodes passées / Méthodes d'aujourd'hui	33
3. Corrélation entre les différentes techniques	33
3.1. Méthodes de comptage des particules (compteurs automa- tiques, impacteurs) et microscopie optique à contraste de phase	33
3.2. Enregistreur à laser	34
3.3. Comparaison entre les méthodes microscopiques	35
3.3.1. Microscopie optique à contraste de phase et micros- copie électronique à balayage	35
3.3.2. Microscopie optique à contraste de phase et micros- copie électronique à transmission	35
3.3.3. Microscopie électronique à balayage et microscopie électronique à transmission	36
3.4. Comparaison entre la méthode directe et la méthode indi- recte en microscopie électronique à transmission	36
3.5. Comparaison entre les concentrations massiques et les concentrations numériques	38
4. Interprétation des données	38
5. Utilisation des mesures anciennes pour la quantification des risques de cancer	39
Références bibliographiques	43

3

Métrologie

Il existe très peu de données quantitatives fiables sur les expositions à l'amiante 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'amiante 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.

En Grande Bretagne, le compteur à particules automatique a été employé mais a été remplacé par le précipitateur thermique où les particules étaient comptées au microscope optique.

Aux Etats-Unis et en Allemagne, les appareils à impaction (midget-impinger Koniomètre) ont été plus largement utilisés avec également une observation des particules au microscope optique. Les données obtenues avec ces instruments incluaient les particules organiques souvent présentes en grande quantité.

En France, l'appareil le plus utilisé mis au point dans les années 1950 par l'Institut National de Recherche Chimique Appliquée (IRCHA) était un appareil de filtration où l'échantillon était obtenu en aspirant un volume d'air connu sur un filtre. La matière organique était éliminée avant l'observation qui était faite au microscope optique. Les résultats étaient exprimés en mg/m^3 et en nombre total de particules par litre.

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 une observation au microscope optique à contraste de phase (MOCP) commença à être utilisée. Puis à partir de 1975 il y a eu standardisation de cette méthode avec la définition d'une fibre et du mode de comptage dans une surface limitée par un réticule de diamètre fixe. C'est cette méthode qui est encore utilisée en hygiène industrielle pour contrôler les empoussièrtements dans les établissements où le personnel est exposé à l'action des poussières d'amiante. Elle ne permet pas d'identifier la composition chimique ni d'accéder aux caractéristiques granulométriques des fibres. Elle est réservée au contrôle de l'empoussièrtement des lieux de travail où les fibres inorganiques prédominent et ne doit être employée qu'avec une connaissance approfondie des matériaux utilisés

qui peuvent être analysés avec d'autres méthodes par exemple la microscopie optique en lumière polarisée et la microscopie électronique. Quand elle est couplée avec un système d'analyse chimique de type spectromètre dispersif en énergie de rayons X (SDEX), cette dernière méthode permet d'identifier des fibres d'amiante. Aussi, compte tenu de la granulométrie de ces fibres et notamment du diamètre moyen (0,03 micron) des fibrilles élémentaires de chrysotile, 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.

1. Les techniques de mesure d'aujourd'hui

Elles permettent de contrôler les atmosphères des lieux de travail mais également, ce qui n'était pas le cas auparavant, d'étudier la pollution atmosphérique à l'intérieur des locaux. Il y a eu de nombreuses utilisations de l'amiante dans les bâtiments notamment pour l'isolation thermique et le traitement de surface des structures métalliques, dans les dalles de sol, de plafonds, dans les cloisons murales et le Fibrociment. Les matériaux peuvent être friables, c'est le cas des flocages et calorifugeages, ou non friables.

Plusieurs aspects importants doivent être considérés pour évaluer une exposition à l'amiante. Ils doivent prendre en compte :

- l'exposition personnelle des individus à risque ou de ceux qui ont une exposition similaire comme les employés de ménage, les travailleurs de maintenance qui peuvent perturber les matériaux contenant de l'amiante et provoquer une augmentation des niveaux de pollution ;
- l'exposition passive des personnes travaillant dans les locaux où il y a des matériaux contenant de l'amiante, comme les employés de bureaux, les enseignants et les étudiants qui peuvent avoir un risque potentiel ;
- l'exposition à distance, reliée à une source qui provient de travaux sur des matériaux contenant de l'amiante. L'évaluation doit permettre de déterminer l'étendue du relargage des fibres dans l'air dans des circonstances spécifiques et de mesurer les pics d'exposition.

1.1. Echantillonnage

La méthode de prélèvement doit tenir compte de ces différents aspects et de la connaissance des effets biologiques des fibres d'amiante. Différentes têtes de prélèvement sont utilisées, cependant l'objectif est d'obtenir un échantillon représentatif sur la surface d'un filtre.

L'échantillonnage le mieux adapté pour déterminer l'exposition des employés de maintenance qui peuvent perturber les matériaux contenant de l'amiante

reste le prélèvement individuel utilisé en hygiène industrielle, effectué dans la zone respiratoire des travailleurs, pendant la période qui les expose le plus.

Pour les occupants des bâtiments qui n'ont pas de contact avec les matériaux, les concentrations de fibres dans l'air qu'ils respirent sont plus uniformes. L'échantillonnage le plus représentatif est le prélèvement d'air d'ambiance effectué en une zone fixe, pendant une période longue afin d'obtenir une bonne limite de détection, uniquement aux heures d'activité et d'occupation des locaux pour prendre en compte les effets intermittents de remobilisation des fibres liés à l'activité. En effet, ce facteur d'émission secondaire est déterminant dans le mécanisme d'établissement d'une pollution intérieure à partir d'un matériau contenant de l'amiante. Des mesures effectuées avec et sans activité à l'intérieur des mêmes locaux ont montré des taux de pollution de l'ordre de 10 à 100 fois plus élevés quand il y avait une activité (Sébastien et al., 1979). Ce phénomène a été confirmé par Guillemain et al. (1989), qui ont comparé le profil de la pollution dans des locaux occupés et pendant les congés ou pendant une période de fermeture. D'autres facteurs tels que les mouvements d'air, les vibrations, les variations thermiques peuvent produire des émissions constantes de fibres, de même que les impacts, les dégradations ponctuelles liés aux travaux de maintenance qui sont des sources d'émissions occasionnelles. Ces différentes émissions sont prises en compte dans les prélèvements de longue durée effectués à l'intérieur des locaux.

Pour mesurer les pics d'expositions des individus travaillant au voisinage d'une source d'émission liée à des travaux mais n'étant pas en contact direct, le prélèvement d'ambiance réalisé pendant la période des travaux, dans la zone où ces individus sont présents, semble le plus adéquat. Cependant, les méthodes utilisées actuellement ne sont pas bien adaptées pour évaluer ce type d'exposition. En effet, cette situation nécessite de faire des prélèvements de courtes durées pendant les travaux et la méthode d'échantillonnage par prélèvements individuels ou d'ambiance comme celle réalisée en hygiène industrielle ne convient pas dans le cas présent, de même que la méthode employée pour évaluer les expositions des occupants des locaux qui nécessite un temps de prélèvement conséquent pour obtenir une bonne représentativité de l'échantillonnage et une bonne sensibilité d'analyse.

1.2. Méthodes d'analyses

La stratégie de mesure doit tenir compte des points suivants :

L'étendue et la nature des effets sur la santé des fibres d'amiante déposées dans les poumons dépendent du nombre de fibres déposées dans des régions spécifiques du poumon et de leurs propriétés physico-chimiques. Les données importantes à prendre en compte incluent les longueurs, les diamètres, la composition chimique, la durabilité des fibres et les niveaux d'exposition. D'autres particules existent dans l'air si bien que les fibres d'amiante peuvent seulement être présentes à des niveaux de moins d'une partie par million. Le

volume total d'air ambiant qui peut être prélevé pour une étude directe par microscopie optique à contraste de phase ou par microscope électronique est limité par les concentrations de ces autres particules.

Dans le but d'identifier, de mesurer et de compter les fibres d'intérêt dans les prélèvements d'air, seules les méthodes microscopiques doivent être utilisées.

Les mesures des concentrations en fibres, notamment celles effectuées dans l'évaluation des expositions professionnelles des employés directement en contact avec les matériaux contenant de l'amiante, sont réalisées au microscope optique à contraste de phase. La résolution d'image de ces microscopes est de l'ordre de 0,2 à 0,3 micron.

Dans les années plus récentes, des mesures ont aussi été faites avec le microscope électronique à balayage (MEB). En fonction des conditions opératoires, la limite de visibilité des fibres d'amiante au MEB est de l'ordre de 0,15 à 0,2 micron, un système d'analyse chimique peut être couplé avec ce type de microscope.

Cependant, parmi toutes les méthodes microscopiques d'analyse, le microscope électronique à transmission (MET) est l'instrument le plus performant pour détecter, identifier et mesurer les fibres d'amiante. Sa résolution d'image est de 0,0002 micron, bien au-dessus du diamètre des fibres d'amiante les plus fines qui sont approximativement de l'ordre de 0,01 micron. Les différentes formes minéralogiques d'amiante et les fibres minérales « non amiante » peuvent être identifiées sans ambiguïté par une analyse au MET en couplant les caractéristiques morphologiques, cristallographiques (par microdiffraction) et chimiques (par microanalyse) en associant à la microscopie un système d'analyse chimique de type spectromètre dispersif en énergie des rayons X.

1.2.1. Microscopie optique

La méthode du filtre à membrane, avec observation des fibres respirables de diamètre (d) inférieur à 3 microns, de longueur (l) supérieure ou égale à 5 microns et de rapport l/d supérieur à 3, au microscope optique à contraste de phase à un grandissement de $\times 400$, est la méthode standard (Norme AFNOR X43 269, 1991) pour mesurer les expositions en hygiène industrielle. Elle a été utilisée pour obtenir l'index d'exposition dans les études épidémiologiques et les estimations des risques professionnels. Cependant elle n'est pas bien adaptée pour mesurer la pollution à l'intérieur et l'extérieur des locaux car elle n'est pas capable d'identifier les fibres d'amiante et a une résolution d'image limitée.

1.2.2. Microscopie électronique à balayage

Plusieurs approches ont été utilisées pour analyser les fibres d'amiante dans des prélèvements d'air au microscope électronique à balayage. Cet appareil moins coûteux que le microscope électronique à transmission requiert une

préparation plus simple et les fibres peuvent être identifiées dans certaines limites avec un système d'analyse chimique élémentaire. Certains appareils peuvent, à forts grossissements, atteindre des résolutions qui permettraient de détecter les fibres d'amiante ; cependant des considérations autres que la résolution, font que ce type d'appareil n'est pas capable de déterminer correctement l'amiante dans l'air. En effet, la détection des fibres d'amiante sur la surface d'un filtre nécessite une bonne image avec un contraste suffisant. Quand le microscope électronique à balayage est utilisé à fort grossissement, un compromis doit être fait entre la résolution d'image et le signal. Ce compromis conduit, en routine, à obtenir une résolution proche de celle de la microscopie optique. De plus, l'analyse chimique associée avec le microscope électronique à balayage est la seule technique disponible pour identifier les fibres, ce qui en limite l'intérêt, car la composition chimique issue du spectre d'analyse est souvent insuffisante pour distinguer les variétés d'amiante de quelques autres minéraux fibreux.

L'identification définitive des fibres d'amiante nécessite la combinaison des données chimiques avec la cristallographie obtenue seulement par diffraction électronique au microscope électronique à transmission.

La méthode de détermination des concentrations en fibres d'amiante dans l'air utilisant le microscope électronique à balayage est la méthode de référence de l'association internationale de l'amiante (AIA) depuis 1984 et est préconisée par l'association germanique des ingénieurs (Verein deutsche Ingenieure, 1985). Le grossissement à utiliser pour effectuer les analyses doit être de l'ordre de $\times 2000$ à 2500 et les fibres à déterminer doivent être plus grandes que $2,5$ microns de longueur et $0,2$ micron de diamètre. Cette méthode est utilisée en Allemagne et en Suisse pour mesurer la pollution dans l'air ambiant à l'intérieur des locaux.

1.2.3. Microscopie électronique à transmission

La microscopie électronique à transmission donne l'analyse la plus complète pour étudier les fibres d'amiante dans l'air. La très haute puissance de résolution de cette méthode et la possibilité d'accéder à l'identification minéralogique de l'amiante en combinant la diffraction électronique et l'analyse chimique par spectrométrie dispersive en énergie de rayons X font du microscope électronique à transmission la méthode d'excellence pour l'étude de la pollution atmosphérique à l'intérieur des locaux.

Deux méthodes différentes peuvent être utilisées pour la préparation des échantillons. La méthode de transfert direct consiste à préparer directement l'échantillon avec un minimum de perturbation. Ceci nécessite que le prélèvement ne soit pas trop chargé en particules, impliquant une durée d'échantillonnage limitée. La méthode indirecte inclut une phase d'incinération des particules organiques au four à plasma puis une dispersion des particules minérales dans une suspension liquide et une redéposition de cette dispersion sur une membrane intermédiaire. En utilisant des proportions variées de la

dispersion liquide, cette méthode permet de concentrer ou de diluer la matière originale pour donner une charge correcte pour l'analyse. De plus, elle permet d'effectuer des prélèvements de longue durée plus représentatifs et d'avoir une meilleure sensibilité d'analyse.

Le critère de comptage de fibres, la mesure des tailles et les modalités d'identification sont les mêmes pour les deux méthodes.

En France, la norme AFNOR X43 050 sur la détermination de la concentration en fibres d'amiante en microscopie électronique à transmission par la méthode indirecte est préconisée pour la mesure de la pollution par l'amiante à l'intérieur des locaux. Toutes les fibres d'amiante de diamètre inférieur à 3 microns, de longueur supérieure ou égale à 5 microns et de rapport l/d supérieur à 3 sont prises en compte, le grandissement recommandé pour évaluer cette tranche granulométrique est de $\times 10000$.

2. Méthodes passées / Méthodes d'aujourd'hui

Les premières études qui prenaient en compte toutes les particules sans faire de distinction entre les fibres et les non-fibres doivent être regardées avec prudence. Les autres méthodes qui ont suivies pour évaluer les expositions aux fibres d'amiante dans l'industrie ont subi des évolutions dans la technique de prélèvement. La standardisation des règles de comptage a conduit à mieux appréhender ce type d'exposition en prenant comme référence les valeurs limites d'expositions moyennées sur 8 heures. Ces valeurs ont diminué au fur et à mesure des connaissances sur les risques sur la santé.

Ces méthodes ne sont pas applicables dans l'environnement général ; en effet, les fibres d'amiante retrouvées dans l'air ambiant des locaux où il y a présence de matériaux contenant de l'amiante représentent une faible proportion du nombre de particules et des autres fibres susceptibles d'être présentes (fibres organiques, gypse...). Ainsi, seules les méthodes spécifiques en microscopie électronique permettent de mesurer les expositions passives aux faibles doses et la microscopie électronique à transmission est considérée actuellement comme la méthode de référence en France.

3. Corrélation entre les différentes techniques

3.1. Méthodes de comptage des particules (compteurs automatiques, impacteurs) et microscopie optique à contraste de phase

Les premières données collectées dans les usines d'amiante, exprimées en millions de particules par pied cube (mppcf) ou en particules par ml doivent

être converties en fibres par ml (f/ml) pour se référer aux valeurs actuelles de référence. Malheureusement, il n'y a pas de conversion simple possible, les fibres représentant de 3 à plus de 50 % des particules comptées dans les différentes productions (mines, moulins, textile, matériel de friction et amiante ciment). Robock et al. (1984) ont montré qu'il n'existe pas de relation simple entre ces deux méthodes. 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. 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.

Cependant, malgré tous les inconvénients que cela posait, un facteur de conversion moyen a été choisi entre les particules et les fibres. Cette conversion retenue par Doll et Peto (1985) provient de mesures faites en parallèle en 1977. Une valeur de 35 particules par ml est considérée équivalente à 1 mppc et à 1 fibre par ml.

3.2. Enregistreur à laser

Il existe sur le marché des enregistreurs à laser permettant une lecture directe de la concentration en fibres et qui sont conçus pour être l'équivalent d'un comptage en microscopie optique à contraste de phase, sans possibilité d'identification des fibres.

Une étude comparative (Iles et Shenton-Taylor, 1986) faite avec des enregistrements prélevés avec un FAM (Fibrous Aerosol Monitor) et des comptages en microscopie optique à contraste de phase a été effectuée dans différentes usines de fibro-ciment, de matériel de friction et de textile. La corrélation retrouvée était trop faible pour que le FAM soit considéré comme une méthode de remplacement de la microscopie optique, notamment quand la concentration était inférieure à 1 f/ml. De plus cette étude précise qu'il y a un problème de discrimination entre les particules fibreuses et les non fibreuses dans les situations où d'autres poussières sont présentes avec les fibres. Cette étude conclut que le FAM pourrait toutefois être utilisé pour détecter les changements de concentration de nuages de poussières de composition constante.

Une étude de la pollution atmosphérique par l'amiante à l'intérieur des locaux faite par Guillemin et al. (1989) compare également les deux méthodes. Les auteurs montrent que l'ensemble des résultats trouvés en microscopie optique est plus élevé qu'avec le FAM. Cependant ils considèrent que le FAM a les mêmes limites que la microscopie optique mais nécessite une maintenance soigneuse et des contrôles périodiques. L'avantage de cet appareil sur les autres méthodes vient de sa possibilité d'enregistrer des données dans un intervalle de temps connu, ce qui permet de détecter les périodes de pics d'exposition. Néanmoins, pour obtenir une sensibilité d'analyse correcte, il faut que les prélèvements soient de plusieurs heures.

3.3. Comparaison entre les méthodes microscopiques

3.3.1. Microscopie optique à contraste de phase et microscopie électronique à balayage

Bien que ces deux méthodes aient des résolutions d'image très proches (de l'ordre de 0,2 micron de diamètre), les comparaisons effectuées sur des échantillons d'air en prenant en compte les mêmes critères de taille de fibres (diamètre supérieur à 0,2 micron et longueur supérieure ou égale à 5 microns) ne donnent pas les mêmes résultats. En effet, en microscopie optique il n'est pas possible d'identifier les fibres et seul le facteur de forme est pris en compte, une fibre respirable étant définie comme toute particule ayant un diamètre inférieur à 3 microns et un rapport l/d supérieur à 3. En microscopie électronique à balayage, il est possible d'identifier les fibres d'amiante de cette taille au moyen d'un système d'analyse chimique. De plus, dans les atmosphères où d'autres fibres existent, notamment les fibres organiques qui sont souvent majoritaires à l'intérieur des locaux, les méthodes électroniques qui passent par une destruction de la matière organique par une incinération au four à plasma éliminent ces fibres. Ceci conduit, dans les études comparatives, comme l'ont montré Guillemain et al. en 1989, à donner des résultats pour les fibres totales supérieures ou égales à 5 microns d'au moins un ordre de grandeur plus petit en microscopie électronique à balayage qu'en microscopie optique. Cela confirme la non fiabilité des méthodes optiques dans les situations d'expositions non professionnelles.

3.3.2. Microscopie optique à contraste de phase et microscopie électronique à transmission

Il semble difficile de trouver une relation entre ces deux méthodes dans la mesure où la résolution d'image du microscope électronique à transmission est bien supérieure à celle de l'optique et que toutes les fibres quelque soit leur diamètre peuvent être observées. Cette méthode est d'une grande sensibilité et conduit à détecter beaucoup plus de fines fibres. Cependant, en microscopie optique toutes les particules ayant un critère fibre sont prises en compte, ce qui amène à compter des fibres respirables qui ne sont pas de l'amiante et entraîne une augmentation apparente de la concentration.

Ces deux méthodes étant recommandées pour évaluer les niveaux d'exposition d'une part en hygiène industrielle, et d'autre part à l'intérieur des locaux, il importe d'essayer de les comparer. Si une corrélation existait entre ces deux méthodes, elle permettrait de mieux apprécier les risques pour les faibles doses.

Les études menées sur ce sujet dans le secteur primaire (usine d'amiante) ou dans le secteur de la transformation (manufacture) portent essentiellement sur le chrysotile. Elles montrent toutes une augmentation des concentrations constatées quand les mesures sont effectuées en microscopie électronique. Le

critère de taille des fibres d'amiante retenu dans ces comparaisons est identique dans les deux méthodes. Le rapport moyen entre la microscopie électronique et la microscopie optique est variable selon les études : 1,2 dans l'étude de Marconi et al. (1984) (30 échantillons), 2,56 dans celle de Kauffer et Carton (1981) (61 échantillons), 3,8 dans l'étude de Hwang et Wang (1983) (25 échantillons), 4 dans l'étude de Cherrie et al. (1989) (11 échantillons), 4,35 dans celle de Verma et Clark (1995) (65 échantillons).

Une étude comparative faite par Hwang et Gibbs en 1981, sur des aérosols provenant de mines de crocidolite d'Afrique du Sud montre que pour les fibres d'amiante comprises entre 5 et 10 microns de longueur, le nombre de fibres observé par unité de surface est 3 fois plus important en microscopie électronique à transmission (x 15 200) qu'en microscopie optique à contraste de phase (x 400).

L'étude de Cherrie et al. (1989) donne un rapport de 1,7 entre les deux méthodes d'analyse effectuées sur des échantillons de fibres d'amphiboles pures préparées en laboratoire.

3.3.3. Microscopie électronique à balayage et microscopie électronique à transmission

Peu d'études comparatives entre ces deux méthodes ont été menées. Les données de Guillemin et al. sont limitées mais montrent cependant que, lorsque il y a présence de fibres de chrysotile, elles ne sont pas retrouvées en microscopie optique à balayage (MEB) et lorsque il y a présence d'amosite, le résultat est meilleur. Une étude de Broysse et al. (1988) confirme que les mesures faites au microscope électronique à transmission (MET) donnent de meilleurs résultats, cependant elle précise que si le grandissement au microscope à balayage est élevé (x 10000), le résultat serait comparable à celui trouvé au microscope à transmission utilisé à faible grandissement (x 2200) pour les fibres supérieures à 5 microns de longueur.

Tuomi et al. (1992) ont comparé le nombre de fibres nues de crocidolite par ml de lavage broncho-alvéolaire par les deux méthodes. La moyenne des fibres retrouvées est deux fois plus importante en transmission qu'en balayage.

3.4. Comparaison entre la méthode directe et la méthode indirecte en microscopie électronique à transmission

De nombreuses études ont été effectuées pour mesurer la pollution atmosphérique par l'amiante à l'intérieur des locaux en microscopie électronique à transmission ; cependant deux méthodes de préparation existent, la méthode directe et la méthode indirecte. La méthode indirecte consiste à effectuer une incinération de la membrane de prélèvement à faible température dans un four à plasma, ce qui permet de détruire les particules organiques et le substrat du filtre, sans modifier la phase minérale, puis à disperser les cendres obtenues

dans une solution avec un passage aux ultrasons qui peut être très variable (de quelques minutes à plus de 2 heures), entraînant une défibrillation des fibres d'amiante chrysotile en fibrilles élémentaires. Cette phase peut entraîner une augmentation du nombre de fibres selon le temps de traitement. Dans la méthode directe, la membrane de prélèvement est traitée directement après un léger passage au four à plasma.

Plusieurs études montrent que la différence entre ces deux méthodes n'existe que pour les fibres de longueur inférieures à 5 microns et qu'elle augmente quand la longueur diminue et que le temps de passage aux ultrasons utilisé dans la méthode indirecte joue un rôle important dans l'augmentation de la concentration des fibres.

Les études faites aussi bien sur des échantillons massiques d'amiante chrysotile pur (Chatfield, 1983-1985) que sur des prélèvements d'air effectués à l'intérieur des bâtiments (Sébastien et al., 1984, Chesson et al., 1990) confirment qu'il n'y a pas de différence entre les deux méthodes pour les fibres de longueur supérieure à 5 microns quand la durée du traitement aux ultrasons est inférieure à 10 minutes. Une autre étude (Kauffer et al., 1996) effectuée sur des prélèvements provenant de différentes atmosphères montre que les effets peuvent être variables pour les fibres supérieures à 5 microns quand on utilise les ultrasons pendant 7 minutes : dans une usine d'amiante ciment le rapport augmente de 2, dans une usine de papier amiante de 16,3 et à l'intérieur des bâtiments avec des matériaux contenant de l'amiante de 1,5. Par contre, l'utilisation de la méthode indirecte sans passage aux ultrasons mais avec une modification de dispersion des cendres ne montre pas de différence avec la méthode directe pour les fibres supérieures à 5 microns.

Pour les fibres de chrysotile plus courtes, inférieures à 5 microns de longueur, le rapport entre la méthode directe et la méthode indirecte peut varier selon les études et selon les longueurs prises en compte. Dans l'étude de Chatfield (1983, 1985), il passe de 17 pour les fibres inférieures à 0,5 micron à 9 pour celles comprises entre 0,5 et 1 micron et à 1,6 pour les fibres comprises entre 2,5 et 5 microns de longueur. Dans l'étude de Sébastien (1984), le rapport est de 6 pour les fibres comprises entre 0,5 et 1 micron de longueur. Dans l'étude de Kauffer et al. (1996) on trouve un rapport de 4 pour les fibres inférieures à 1 micron de longueur et de 2 pour celles comprises entre 1 et 5 microns.

Pour comparer les données obtenues par ces deux méthodes, il faut tenir compte des caractéristiques de la préparation et notamment du temps de passage aux ultrasons dans la méthode indirecte et de la tranche de longueur que l'on compare. Un facteur correctif multiplicatif est à adopter quand on utilise les valeurs de la littérature obtenues par la méthode directe si on les compare à celles obtenues par la méthode indirecte. De plus la sensibilité d'analyse de ces méthodes est fortement dépendante de la durée du prélèvement, ainsi, les résultats sont donnés avec une sensibilité à 1 F/l pour la méthode directe, et à 0,3 F/l pour la méthode indirecte si on applique la norme X43 050 utilisée en France.

3.5. Comparaison entre les concentrations massiques et les concentrations numériques

Les premières études faites dans les années 1970 pour déterminer la pollution en fibres d'amiante à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments ont été effectuées aux Etats Unis et en France en utilisant la méthode indirecte au microscope électronique à transmission. En France, en 1974 et 1975, une étude du fond général de pollution par l'amiante de l'air extérieur à Paris a été réalisée par cette méthode (Sébastien et al., 1979). Les concentrations retrouvées servent toujours de valeur de référence pour évaluer la pollution à l'intérieur des locaux avec des matériaux contenant de l'amiante.

Les premières mesures, et ce jusqu'en 1990, prenaient en compte les fibres d'amiante de toute longueur et les résultats étaient exprimés en concentrations massiques (ng/m^3). Afin de comparer les résultats retrouvés dans l'environnement général avec ceux de l'hygiène industrielle, une transformation de la méthode de préparation (diminution du temps ultrasons à 7 mn au lieu de 2 heures) et du comptage (prise en compte uniquement des fibres d'amiante supérieures à 5 microns de longueur) a été effectuée. Les résultats étaient ainsi exprimés en concentrations numériques (fibres par litre : F/l).

Bignon et al. (1990) ont établi une droite de régression liant la concentration en F/l à la concentration massique en ng/m^3 ($y = -0,1137 + 0,5532 x$ avec une corrélation $r = 0,93$). Elle permet de convertir en fibres par litre les valeurs du fond général de pollution extérieure obtenues à l'époque, de reprendre les anciennes mesures pour les comparer à celles retrouvées actuellement aussi bien dans l'environnement général que dans l'environnement professionnel.

4. Interprétation des données

En France, les mesures effectuées à l'intérieur des locaux avec des matériaux contenant de l'amiante, au microscope électronique à transmission par la méthode indirecte, sont comparées aux valeurs du fond général de pollution extérieur à Paris. L'identification d'une source de contamination est faite par référence à ces valeurs. L'étude de Sébastien et al. (1979) montrait que les niveaux de pollution par l'amiante à l'extérieur à Paris étaient tous inférieurs à $9 \text{ ng}/\text{m}^3$ (avec la conversion : inférieurs à 4,8 F/l ou 0,0048f/ml) avec une moyenne à $0,6 \text{ ng}/\text{m}^3$ pour la rue et $0,9 \text{ ng}/\text{m}^3$ pour les carrefours, soit un fond de pollution moyen à 0,3 F/l (0,0003 f/ml) et étaient constitués uniquement de fibres d'amiante chrysotile.

Ainsi, il a été établi sur la base de cette étude qu'il y a présence d'une source de pollution intérieure quand la concentration retrouvée est supérieure à 5 F/l (0,005 f/ml). La valeur actuelle recommandée pour entreprendre des mesures correctives (enlèvement, coffrage ou encapsulation) est de 25 F/l (0,025 f/ml)

et pour la restitution des locaux après travaux d'enlèvement de matériaux contenant de l'amiante de 5 F/l (0,005 f/ml). Ces valeurs de référence sont les mêmes pour les fibres de chrysotile et les fibres d'amphiboles.

Une nouvelle étude effectuée par le laboratoire d'étude des particules inhalées en 1993 et 1994 a permis de réévaluer ce fond général de pollution extérieure à Paris (LEPI, 1994). Les mesures ont été réalisées au microscope électronique à transmission par la même méthode que celle utilisée depuis 1990 pour mesurer la pollution par les fibres d'amiante à l'intérieur des locaux. Comme en 1974 il n'a pas été retrouvé de fibres d'amphiboles dans l'air extérieur et la concentration maximale en fibres d'amiante chrysotile de longueur supérieure ou égale à 5 microns obtenue dans cette étude ne dépasse pas 0,47 F/l (0,0004 f/ml) avec une limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % à 1,09 F/l (0,001 f/ml). La moyenne des mesures est de 0,13 F/l (0,0001 f/ml). Si on prend en compte toutes les fibres d'amiante quelle que soit leur longueur, le niveau maximum retrouvé est d'environ 3 F/l (0,003 f/ml)

La concentration maximale en fibres d'amiante à ne pas dépasser à l'intérieur des bâtiments en Allemagne et en Suisse est de 1 F/l (0,001 f/ml), Cependant la méthode d'analyse utilisée est la microscopie électronique à balayage et seules les fibres supérieures à 5 microns de longueur et supérieures à 0,2 micron de diamètre (limite de résolution de l'appareil) sont prises en compte.

5. Utilisation des mesures anciennes pour la quantification des risques de cancer

La quantification des risques de cancer du poumon et de mésothéliome repose sur l'étude de cohortes anciennes (chapitre 9), au sein desquelles les mesures d'exposition ont été faites avec des méthodes qui diffèrent de celles d'aujourd'hui, comme on l'a vu, ce qui pose des problèmes de comparabilité pour les conversions.

Des facteurs de conversion permettant de passer de ces mesures aux f/ml de la méthode de référence ont du être déterminés *a posteriori* pour pouvoir exploiter rétrospectivement les mesures d'expositions réalisées, parfois sur plusieurs décennies dans le passé, sur les cohortes pour lesquelles on pouvait quantifier les risques d'asbestose, de cancer du poumon et de mésothéliome. Pour passer des « mppcf » aux « f/ml », par exemple, des facteurs de conversion ont été calculés pour différentes études épidémiologiques à partir de séries de mesures réalisées par les deux méthodes sur les mêmes prélèvements. Le plus souvent, les corrélations observées étaient faibles (de l'ordre de 0,4 à 0,6) (Figure 1 et Tableau 1) et des variations notables des facteurs de conversion en fonction de l'étude et des intensités d'exposition ont été relevées (Tableau 1). Faute de mieux, ce sont cependant ces facteurs de conversion qui ont été déterminés séparément pour chaque étude puis utilisés pour réexprimer les expositions des individus de chacune des études de cohortes envisagées en « f/ml ».

Enterline (1981) considère que pour comparer les ordres de grandeurs des expositions mesurées en mppcf et en f/ml, le facteur de conversion adéquat est de 3 f/ml pour chaque mppcf. Gibbs (1994) arrive au même ordre de grandeur. Il souligne toutefois que si cette valeur permet de comparer les ordres de grandeur d'expositions sur un plan très général, elle ne peut être utilisée uniformément pour convertir des mesures d'exposition individuelles réalisées dans une cohorte.

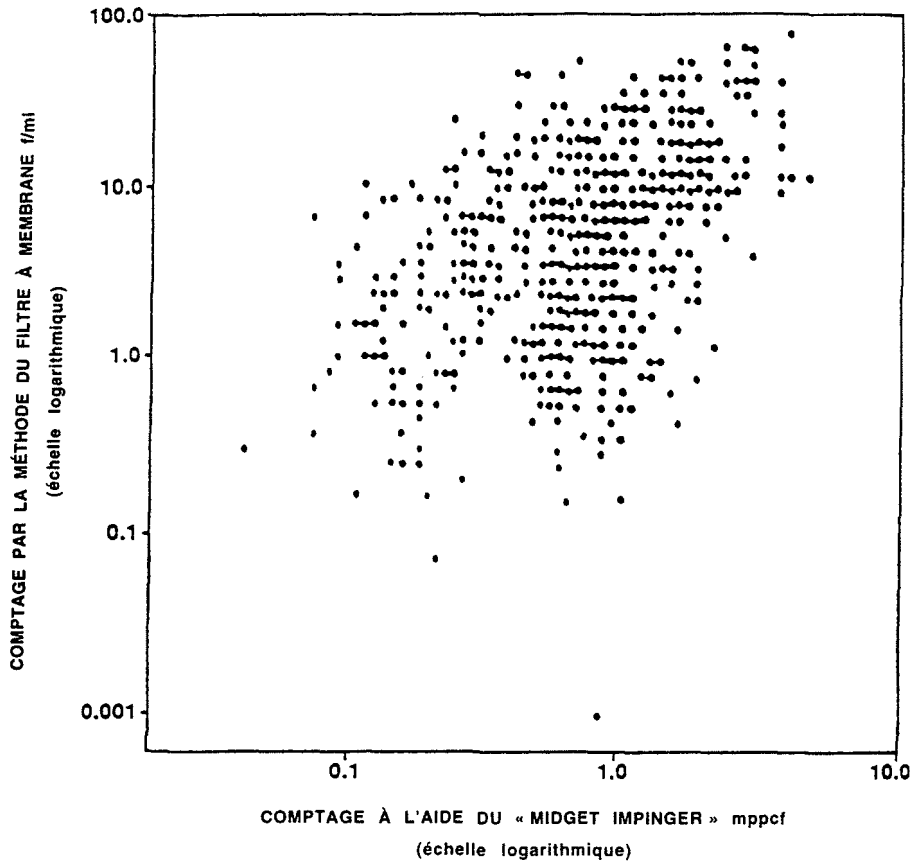


Figure 1 : Corrélation entre deux mesures de l'exposition à l'amiante : Impinger (mppcf) versus méthode du filtre à membrane(f/ml) (d'après Peto et al. (1985)).

Depuis les années 80, la nécessité d'apprécier plus finement les caractéristiques géologiques et morphologiques des expositions à l'amiante, tant pour les recherches expérimentales et épidémiologiques que pour le contrôle des expositions, et le fait que les intensités d'exposition à mesurer étaient de plus en

Tableau 1 : Facteurs de conversion observés dans différentes populations professionnelles et pour différents niveaux d'exposition conversion des mppcf en f/ml) (d'après Esmen et al. (1990)).

Type d'amiante et de « process »	Rapports de comptage ¹					r ⁵
	Impinger mppcf ²	Konimetre ³		précipitateur thermique ⁴		
		1	5	1	5	
chrysotile						
textile	5.9	-	-	-	-	0.6
produits de friction	2.2	-	-	-	-	0.6
conduits en amiante-ciment	1.9	-	-	-	-	0.0
mines	-	8.1	2.8	9.8	3.2	0.4
mines	6-14	-	-	-	-	0.4
crocidolite du Cap						
mines	-	4.3	2.0	4.5	1.5	0.4
crocidolite du Transvaal						
mines	-	6.3	2.6	4.5	1.5	0.4
amosite						
mines	-	7.9	3.2	8.8	4.9	0.4
désintégration	109	-	-	-	1.2	?

¹ Rapport du chiffre de concentration indiqué par l'instrument au chiffre de concentration indiqué par la microscopie à contraste de phase (filtre à membrane) pour des fibres de longueur supérieure à 5 µm, mesurées au grossissement x 430

² mppcf = millions de particules par pied cubique

³ Konimètre de type Witwaterstrand

⁴ Précipitateur thermique standard de Casella ; pour ces 2 appareils, les concentrations sont données en fibres par ml ; elles correspondent au chiffre donné par l'instrument pour un échantillon de concentration « 1 F/ml » ; 1 et 5 réfèrent aux échelles de lecture, 1 pour « faible », 5 pour « élevée ».

⁵ coefficient de corrélation approché.

plus basses, ont conduit à promouvoir l'utilisation de la microscopie électronique. Dans la littérature, les mesures effectuées selon cette méthode sont le plus souvent exprimées en fibres par litre (F/l).

Pour tirer parti de ces nouvelles possibilités méthodologiques, Lippmann (1988) a proposé de retenir trois indices d'exposition distincts selon que l'on s'intéresse à la fibrose pulmonaire, au mésothéliome pleural ou au cancer du poumon :

- surface totale des fibres de longueur > 2 µm et de diamètre > 0,15 µm pour la fibrose pulmonaire,
- nombre de fibres de longueur > 5 µm et de diamètre < 0,1 µm pour le mésothéliome,
- nombre de fibres de longueur < 10 µm et de diamètre > 0,15 µm pour le cancer du poumon.

L'objectif de ces recommandations est de tenir compte des connaissances les plus complètes et les plus récentes sur les mécanismes par lesquels l'exposition à l'amiante, dans les conditions expérimentales, peut être à l'origine de ces

différents risques. Pour intéressants qu'ils soient sur le plan de la recherche, ces indices n'ont cependant pas encore été utilisés et validés sur le plan épidémiologique. On ne dispose en effet d'aucune information quantitative liant les risques de cancer du poumon et de mésothéliome chez l'homme à une évaluation longitudinale de l'exposition de tous les membres d'une cohorte mesurée selon ces indices.

Les risques de cancer associés à une exposition mesurée en « f/ml » selon la méthode de microscopie optique de référence ne sont pas nécessairement égaux aux risques qui correspondent à une exposition mesurée en « f/l » en microscopie électronique et dont la valeur numérique serait simplement 1 000 fois moindre. Les deux méthodes diffèrent en effet par la technique de comptage : la microscopie électronique permet de ne dénombrer que les seules fibres d'amiante alors que les autres techniques (« mppcf » et « f/ml ») prennent en compte un ensemble beaucoup plus large de particules. Ainsi, les relations dose x risque qui ont été établies à partir de cohortes professionnelles sont fondées sur des mesures d'exposition (« mppcf » converties en « f/ml » ; « f/ml ») qui peuvent inclure une fraction importante de particules qui ne sont pas des fibres d'amiante, comme par exemple dans les cohortes de mineurs ou d'ouvriers de l'amiante textile. L'exposition cancérogène étant « diluée » dans un ensemble plus important de fibres, les coefficients de risque que l'on a calculé sont selon toute vraisemblance largement inférieurs aux coefficients de risque qui auraient pu être calculés si des mesures avaient pu être faites en microscopie électronique. Inversement, une exposition mesurée en « F/l » est vraisemblablement équivalente, du point de vue des risques de cancer, à une exposition supérieure à 1 000 fois cette valeur en f/ml mesurée en microscopie optique.

Si la microscopie optique à contraste de phase (f/ml) reste très utilisée, ce n'est ainsi pas seulement pour des raisons évidentes de coût, mais aussi parce que toutes les enquêtes de cohorte ont été faites avec cette mesure d'exposition ou réexprimées selon celles-ci. Il en résulte que toutes les estimations de risques publiées à ce jour sont exprimées selon cet indice d'exposition et c'est donc celui que nous utiliserons pour la quantification des risques de cancer pour les mêmes raisons. Il en résulte également que pour pouvoir utiliser les estimations de risque que nous proposerons, les niveaux d'exposition considérés devront être exprimés en f/ml définies et mesurées comme indiqué ci-dessus ou converties à partir des « F/l » en « f/ml » en utilisant les facteurs de conversion appropriés.

Notons enfin que la quasi-totalité des expositions environnementales a été mesurée en concentration massique exprimée en ng/m^3 . Compte tenu de l'importance de la morphologie des fibres dans les risques de cancer, cette mesure est loin d'être satisfaisante du point de vue épidémiologique. Pour permettre de comparer les ordres de grandeur des différentes situations d'exposition, Enterline (1981) propose de considérer qu'en moyenne la concentration massique d'une fibre par millilitre correspondrait à $40\,000\ \text{ng}/\text{m}^3$.

Cette estimation est peu différente des valeurs proposées par Corn et al. en 1991, pour qui 1 f/ml équivaldrait à 25 300 ng/m³ ou par le groupe d'expertise du National Research Council (1984) pour qui 1 f/ml équivaldrait à 30 000 ng/m³.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR. 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 à membrane. Association française de Normalisation. 1991, X43-269. ISSN : 0335-3931.

AFNOR. Qualité de l'air - Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission - Méthode indirecte. Association française de Normalisation. Sous presse. 1995, X43 050.

BIGNON J, DUFOUR G, BILLON-GALLAND MA, BROCHARD P. Is there a health hazard for building occupants of airborne mineral fibers exposure ? *Aerobiologia*. 1990, 6 : 4-7.

BROYSSE PN, CHERRIE JW, ADDISON J, DODGSON J. Evaluation of airborne asbestos concentrations using TEM and SEM during residential water tank removal. *Ann Occup Hyg*. 1989, 2 : 243-256.

CHATFIELD EJ. Measurement and interpretation of asbestos fibre concentrations in ambient air. In : *Proceedings of the Fifth colloquium on dust measuring technique and strategy*. Johannesburg, South Africa. : Baunach F. Asbestos International Association, London, England, 1985, pp 269-296.

CHATFIELD EJ. Short mineral fibers in airborne dust. In : *Short and thin mineral fibers*. Solna, Sweden. : Chatfield, EJ. National board of occupational safety and health. 1983, pp 9-93.

CHERRIE J, ADDISON J, DODGSON J. Comparative studies of airborne asbestos in occupational and non-occupational environments using optical and electron microscope techniques. In : *Non occupational exposure to mineral fibres*, J Bignon, J Peto, R Saracci (Eds) Lyon, France : IARC vol 90, 1989, pp304-309.

CHESSON J, HATFIELD J, SCHULTZ B, DUTROW E, BLAKE J. Airborne asbestos in public buildings. *Environ Res*. 1990, 51 : 100-107.

CORN M, CRUMP K, FARRAR DB, LEE RJ, MCFEE DR. Airborne concentrations of asbestos in 71 school buildings. *Regul Toxicol Pharmacol*. 1991, 13 : 99-114.

DOLL R, PETO J. Effects on health of exposure to asbestos. Health and Safety Commission. Her Majesty's Stationery Office. London. 1985, 58p.

ENTERLINE PE. Extrapolation from occupational studies : a substitute for environmental epidemiology. *Environ Health Perspect*. 1981, 42 : 39-44.

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

GIBBS GW. The assessment of exposure in terms of fibres. *Ann Occup Hyg.* 1994, **38** : 477-487,409-10.

GUILLEMIN MP, MADELAINE P, LITZISTORF G, BUFFAT P, ISELIN F. Asbestos in buildings. *Aerosol Science and Technology.* 1989, **11** : 221-243.

HEI-AR. Asbestos in public and commercial buildings : A literature review and synthesis of current knowledge. Cambridge (USA) : Health Effects Institute-Asbestos Research. 1991.

HWANG CY, GIBBS GW. The dimensions of airborne asbestos fibres - I. Crocidolite from Kuruman area, Cape province, South Africa. *Ann Occup Hyg.* 1981, **24** : 23-41.

HWANG CY, WANG ZM. Comparison of methods of assessing asbestos fiber concentrations. *Arch Environ Health.* 1983, **38** : 5-10.

ILES PJ, SHENTON-TAYLOR T. Comparaison of fibrous aerosol monitor (FAM) with the membrane filter method for measuring airborne asbestos concentrations. *Ann Occup Hyg.* 1986, **30** : 77-87.

KAUFFER E, BILLON-GALLAND MA, VIGNERON JC, VEISSIERE S, BROCHARD P. Effect of preparation methods on the assessment of airborne concentrations of asbestos fibres by transmission electron microscopy. *Ann Occup Hyg.* sous presse. 1997.

KAUFFER E, CARTON B. Rapport final : « Utilisation des microscopies électroniques pour la métrologie des poussières d'amiante ». Vandœuvre les Nancy : INRS. 1981, N° 1055.

LIPPMANN M. Asbestos exposure indices. *Environ Res.* 1988, **46** : 86-106.

MARCONI A, MENICHINI E, PAOLETTI L. A comparison of light microscopy and transmission electron microscopy results in the evaluation of the occupational exposure to airborne chrysotile fibres. *Ann Occup Hyg.* 1984, **28** : 321-331.

MARTINON L, BILLON-GALLAND MA, VALENTIN F, BROCHARD P. Contrat Ministère de l'Environnement n°93131. Contribution à l'étude de l'exposition des citoyens aux particules atmosphériques inhalables : étude quantitative et qualitative des particules fibreuses en agglomération parisienne. 1994.

National Research Council (NRC). Asbestiform fibers : non-occupational health risks committee on non-occupational health risks of asbestiform fibers, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC. 1984.

PETO J, DOLL R, HERMON C, BINNS W, CLAYTON R, GOFFE T. Relationship of mortality to measures of environmental asbestos pollution in an asbestos textile factory. *Ann Occup Hyg.* 1985, **29** : 305-355.

ROBOCK K, ISSEROW LW, SELLES DJA. Asbestos and other natural mineral fibres. Environmental Health Criteria. World Health Organisation. Geneva, Switzerland. 1984, 53 : 32.

SÉBASTIEN 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 : 401-415.

SÉBASTIEN P, PLOURDE M, ROBB M, ROSS M. Ambient air asbestos survey in Quebec Mining Towns. Part 1 : Methodological study. Environmental Protection Service, Environment Canada, Montreal, Quebec, Canada. 1984 : pp1-41.

TUOMI T. Fibrous minerals in the lungs of mesothelioma patients : comparison between data on SEM, TEM, and personal interview information. *Am Ind Med.* 1992, 21 : 163-175.

Verein Deutsche Ingenieure. Mesure de particules fibreuses inorganiques dans l'air ambiant. Reichtlinie 3492 - VDI Verlag. Dusseldorf. 1985.

VERMA DK, CLARK NE. Relationships between phase contrast microscopy and transmission electron microscopy results of samples from occupational exposure to airborne chrysotile asbestos. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1995, 56 : 866-873.