

Fibres minérales artificielles et amiante

Rapport du groupe scientifique pour la surveillance des atmosphères de travail (G2SAT)

Le groupe scientifique pour la surveillance des atmosphères de travail (dit « G2SAT ») est un groupe de travail rattaché au Conseil supérieur de la prévention des risques professionnels.

Le ministère du Travail a souhaité que ce groupe aborde la problématique de l'amiante et de ses fibres de substitution potentielle – en se limitant à ce qu'on désigne généralement par « fibres minérales artificielles » – et qu'il présente un rapport rendant compte des connaissances, questions, avis et propositions éventuelles dans ce domaine.

Du document remis au ministère du Travail, en juin 1996, sont extraits le corps du rapport et quelques-uns des documents joints en annexes susceptibles d'intéresser particulièrement les médecins du travail. Pour ceux qui le souhaiteraient, le document complet peut être demandé auprès du ministère du Travail.

1. INTRODUCTION

L'amiante est un matériau naturel, minéral et fibreux, utilisé depuis l'antiquité. Son coût faible et ses propriétés physico-chimiques remarquables (légèreté, résistance mécanique, thermique et chimique, isolant phonique) ont conduit à son exploitation industrielle à partir des années 1870. Malheureusement, l'amiante forme très facilement des fibres extrêmement fines, invisibles à l'œil nu, susceptibles d'être aéroportées, inhalées et déposées dans les voies pulmonaires. Les diamètres des fibrilles élémentaires sont d'environ 0,035 µm pour le chrysotile, et 0,1 à 1 µm pour les amphiboles (amosite et crocidolite). La longueur des fibres peut dépasser 200 µm.

La limite supérieure de diamètre aérodynamique ⁽¹⁾ pour lequel une fibre est susceptible d'être déposée dans le poumon profond humain est d'environ 3,5 µm. Ce sont les fibres de moins de 1 µm de diamètre aérodynamique qui présentent la probabilité maximale de dépôt dans la région

alvéolaire. Les fibres de longueur supérieure à 20 µm se déposent plus naturellement aux embranchements des bronches, par impaction. Les fibres ne restent pas toutes à l'endroit où elles se sont déposées ; une partie est déplacée après phagocytose par un macrophage ou par d'autres mouvements. C'est le phénomène dit de translocation, dont tous les mécanismes ne sont pas bien connus, et qui explique la présence possible de fibres jusque dans la plèvre, les canaux et ganglions lymphatiques, et même dans le sang et l'urine.

Les propriétés toxiques redoutables de l'amiante pour le poumon étaient mises en évidence dès les années 1900 pour la fibrose (effet lié à de fortes expositions), mais plus tardivement pour les autres affections : cancers broncho-pulmonaires (avec des temps de latence de plusieurs dizaines d'années), plaques pleurales (épaississements locaux de la plèvre), mésothéliomes (cancers rares, quasi-spécifiques de l'exposition à l'amiante, avec également de très longs temps de latence). L'amiante est un cancérigène pour l'homme, sans qu'il soit possible de dire avec certitude s'il existe des niveaux d'exposition n'entraînant qu'un risque cancérigène non séparable du « bruit de fond ». L'effet synergique du tabac (c'est-à-dire aggravant l'atteinte, raccourcissant les temps de latence ou augmentant la prévalence des effets cancérigènes pour le poumon) est également reconnu.

⁽¹⁾ Le diamètre aérodynamique d'une particule dans l'air est le diamètre qu'aurait une sphère de densité unité dont la vitesse limite de chute dans l'air calme (à même température et pression) serait identique à celle de la particule.

De nombreux produits de substitution potentielle à l'amiante, fibreux et non fibreux, existent ou ont été mis sur le marché à partir des années 1940 (fig. 1). Le présent rapport n'examine que les fibres de substitution collectivement désignées « fibres minérales artificielles » (FMA) (tableau I).

Les diamètres réels des FMA sont largement répartis autour de la valeur nominale.

De nombreuses études expérimentales in vitro et sur animaux de laboratoire ont permis de soupçonner que les propriétés toxicologiques de l'amiante sont liées à un ensemble de paramètres plus ou moins interdépendants, essentiellement longueur et diamètre des fibres, et durabilité en milieu pulmonaire (biopersistance). D'autres paramètres jouent aussi un rôle, par exemple les propriétés de surface (parmi lesquelles la présence de fer disponible à l'état d'oxydation +2) ou la dissolution de certaines espèces minérales (comme le relargage du magnésium en milieu acide pour le chrysotile). Le mécanisme de la cancérogenèse est très complexe, faisant intervenir des phénomènes en phase hétérogène (catalyse en surface par exemple), des molécules chimiques émises par les cellules présentes en milieu pulmonaire (telles que cytokines et espèces activées de l'oxygène), et sans doute aussi des facteurs génétiques.

En raison même des similitudes plus ou moins grandes avec l'amiante, et de la crainte de ce qu'on appelle parfois « l'effet fibre », des études scientifiques cherchent à savoir

si les fibres minérales artificielles de substitution proposées pour divers usages sur le marché (fibres de verre, de laine de roche et de laitier, fibres céramiques réfractaires) n'auraient pas en commun avec l'amiante certains des effets toxiques qu'elle exerce au niveau pulmonaire. Les études expérimentales sur animaux et les études épidémiologiques ont apporté des connaissances très importantes, souvent complétées par d'autres études fondamentales (comme les expériences in vitro ou les méthodes d'injection intracavitaire).

2. ETUDES EXPERIMENTALES PAR INHALATION

2.1. Validité de la méthode

Ces études sont les plus appropriées, a priori, parce que reproduisant les caractéristiques essentielles de l'exposition humaine : inhalation, pénétration dans l'appareil pulmonaire (avec sélection en fonction des longueur et diamètre), intervention des processus de défense et d'épuration pulmonaire, effets fonction de la dose, du temps d'exposition et de périodes sans exposition.

Ainsi, sur le rat exposé par inhalation ont été régulièrement observées des incidences accrues de carcinomes bronchiques et de mésothéliomes pleuraux ; cet animal est donc un modèle expérimental acceptable d'étude des effets potentiels de l'amiante sur l'homme, du moins sur le plan qualitatif, avec l'avantage de temps de réponse relativement brefs et de coûts limités par rapport à l'utilisation de primates, par exemple.

Ces études restent critiquables dans l'absolu, dans la mesure où l'animal d'expérience ne peut pas être substitué à l'homme, en raison de multiples différences anatomiques, biologiques et physiologiques. Déjà certaines fibres susceptibles d'atteindre le poumon profond chez l'homme ne sont pas inhalables par le rat. Par ailleurs, les branchements des bronches du rat sont asymétriques, et les bronchioles terminales donnent directement dans les sacs alvéolaires, sans bronchioles respiratoires. Au contraire, l'homme présente un système de branchements relativement symétriques et un réseau développé de bronchioles respiratoires. L'importance de ces différences tient au fait que, chez l'homme, les dépôts et lésions primitives se produisent aux intersections, tandis qu'elles surviennent aux bifurcations débouchant dans les sacs alvéolaires chez le rat. Chez le hamster, on observe, au contraire du rat, une certaine insensibilité aux effets pulmonaires, mais une certaine propension à la formation de mésothéliomes, plutôt rares chez le rat.

TABLEAU I

Catégories de FMA, diamètres nominaux et méthodes de fabrication

Catégorie de fibres	Diamètre nominal (µm)	Fabrication
Filament continu (verre)	6 à 15	Par étirage
Laines isolantes (de verre, de roche, de laitier)	2 à 9	Par centrifugation ou centrifugation / soufflage
Réfractaires (céramiques et autres)	1,2 à 3	Par soufflage / filage ou au « spinner »
Microfibres de verre à usages spécifiques	0,1 à 3	Par étirage à la flamme

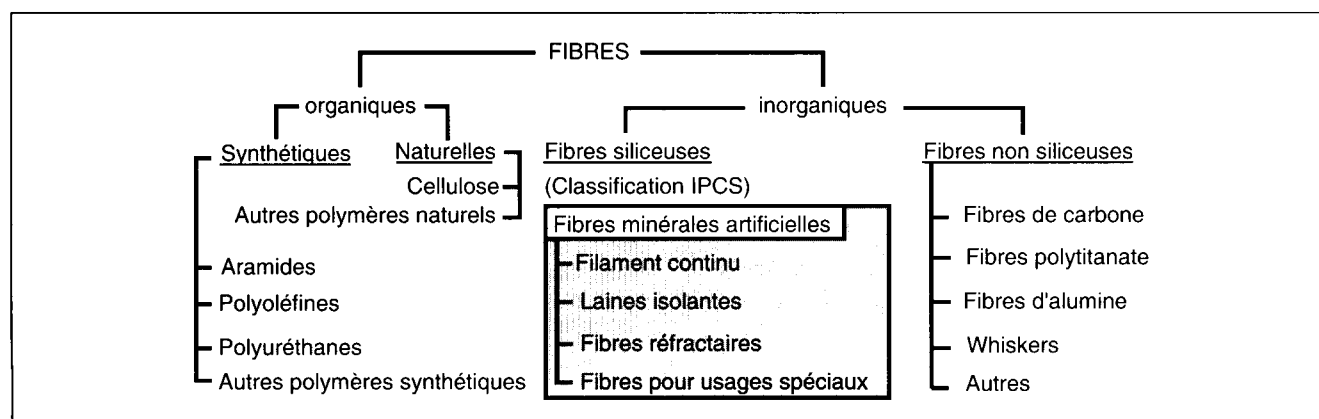


Fig. 1. Classement général possible des fibres

Certains critiquent aussi ces études parce que, à leur avis, le rat est nettement moins sensible que l'homme aux effets de l'amiante, et que ses mécanismes de réponse biologique ne semblent pas toujours suffisamment proches de ceux observés chez l'homme pour pouvoir être transposés.

2.2. Résultats de ce type d'études pour l'amiante

Parce que la cancérogénicité de l'amiante pour l'homme a été reconnue en premier, les études expérimentales ont été conduites plutôt pour comprendre la pathogenèse que pour évaluer le potentiel cancérogène. C'est cette raison qui explique que, pour diverses expériences, le nombre d'animaux par groupe exposé ait été restreint, ou qu'il n'y ait eu qu'un seul niveau d'exposition, ou que la période d'observation ait été insuffisante pour définir l'incidence relative de divers types de cancers. Beaucoup d'essais ont également été effectués avec des échantillons de fibres dont la longueur moyenne était insuffisante selon plusieurs auteurs. Par ailleurs, les techniques de génération des aérosols ont fait de considérables progrès et très peu d'études anciennes atteignent les normes jugées actuellement nécessaires pour une étude de cancérogénicité par inhalation. Il résulte de tout cela qu'on ne dispose pas d'un ensemble optimum de données expérimentales pour l'amiante.

Dès la fin des années 40, des expériences montraient que les fibres d'amiante courtes provoquaient significativement moins de fibrose pulmonaire que les longues. La difficulté de préparer des quantités suffisantes d'aérosols de fibres aux dimensions convenables (le broyage ne permettant pas d'éliminer toutes les fibres longues, les plus actives) a retardé les études systématiques. Ce n'est qu'en 1986 que DAVIS et coll. [1] purent comparer un échantillon d'amosite, dont presque toutes les fibres étaient de longueur inférieure à 5 µm, à un autre non traité, contenant de nombreuses fibres longues. L'échantillon à fibres courtes ne provoqua par injection aucune fibrose et un seul mésothéliome à la dose maximale, alors que celui à fibres longues se montra fortement pathogène. La démonstration la plus frappante fut réalisée par l'équipe de WAGNER [2] avec des échantillons d'ériónite : l'incidence des mésothéliomes, de presque 100 % avec un échantillon normal, se révéla nulle avec un échantillon de fibres courtes.

L'importance de la durabilité en milieu biologique fut soupçonnée à cause des potentiels cancérogènes différenciés, pour l'homme ou l'animal, des divers types d'amiante. Il a été démontré que le chrysotile est nettement plus facilement éliminé du poumon humain que les autres formes. Par ailleurs, il ne présente pratiquement plus d'activité cancérogène (par injection intracavitaire) après attaque acide, laquelle dissout la majorité du magnésium.

Plusieurs études ont montré une relation approximativement linéaire entre l'incidence des cancers pulmonaires et la dose inhalée. Cependant, après de courtes périodes d'exposition (1 jour), l'incidence observée était supérieure à ce que prévoit la linéarité. Dans 2 études, des mésothéliomes ont été observés seulement dans les groupes exposés pour les plus courtes durées. Dans d'autres études, ils semblent se produire surtout pour les animaux ayant reçu les doses les plus fortes.

2.3. Résultats de ce type d'études pour les fibres minérales vitreuses artificielles (FMA)

Dans les études entreprises ces dernières années pour étudier les effets pulmonaires potentiels sur l'animal des FMA, les fibres ont été spécialement sélectionnées pour leur inhalabilité. Les animaux étaient exposés à un échantillon de fibres très fortement enrichi en fibres fines et, en ce

sens, non représentatif de la fabrication réelle, mais qui cherchait à reproduire l'aérosol possible, à des concentrations très élevées, dans le but d'une meilleure mise en évidence du risque.

Dans toutes ces expériences – laines de verre (LV), de roche (LR), de laitier (LL) et fibres céramiques réfractaires (FCR) avec, pour certaines, des expositions témoins à l'amiante – on observe, à cessation de l'exposition, une tendance des animaux à la récupération : réduction des réactions d'inflammation, des microgranulomes, du degré de bronchiolisation. Les fibroses ne régressent pas, mais ne progressent pas non plus, sauf si l'exposition a atteint une durée suffisante (ce qui peut suggérer l'existence d'une charge pulmonaire critique). L'épuration des fibres déposées dans le poumon continue et est très nette pendant ces périodes ; elle est beaucoup plus marquée pour les FMA que pour l'amiante (par exemple – 90 à – 95 % à comparer à – 25 %).

Globalement, laines de verre, de roche et de laitier ne présentent pas de différences toxicologiques significatives à l'exception des fibroses, notées pour la seule laine de roche à partir de 16 mg.m⁻³. L'amiante (crocidolite) forme plus d'adénomes, plus de carcinomes et, seule, des mésothéliomes. A noter que les fibres d'amiante sont (environ 3 fois) plus fines et nettement (20 fois ou plus) plus nombreuses que les autres, mais aussi plus courtes.

Certains auteurs considèrent que les fibres de verre devraient être considérées comme cancérogènes ; d'autres répondent que leurs analyses statistiques ne sont pas valides parce qu'ils ont regroupé les groupes témoins à partir d'études différentes. On peut également s'interroger sur la validité de regroupement de données hétérogènes (fibres et niveaux d'exposition différents). Ces divergences ne sont pas résolues.

Les fibres céramiques semblent comparables entre elles dans ces essais. Elles n'induisent sans doute pas (de façon statistiquement significative) d'adénome, peut-être pas de carcinome (sauf à très hautes concentrations), mais provoquent des mésothéliomes avec une incidence expérimentale comparable voire supérieure (à hautes doses) à celle de l'amiante (chrysotile). Les fibres de cette dernière sont (environ 10 fois) plus fines et nettement (500 fois ou plus) plus nombreuses, mais aussi plus courtes.

Au vu des résultats de l'expérimentation animale, les FCR sont cancérogènes et fibrosantes par inhalation.

3. ETUDES EPIDEMIOLOGIQUES

3.1. Amiante

3.1.1. Cancer pulmonaire

La période moyenne de latence entre la première exposition professionnelle à l'amiante et l'apparition d'un cancer pulmonaire est d'environ 34 ans (étendue de 14 à 57 ans, probablement moins de 10 % des cas présentent une latence inférieure à 20 ans). Cette latence s'allonge sensiblement et peut dépasser 60 années pour des expositions non professionnelles.

Huit études dans lesquelles les expositions individuelles ont été estimées ont montré des relations approximativement linéaires entre l'exposition et la réponse. Cependant, les pentes étaient fortement différentes selon le procédé industriel. Les plus faibles pentes étaient observées pour les mineurs et les travailleurs des produits de friction, les plus fortes pour les travailleurs de l'industrie textile.

Selon l'OMS, il n'est pas facile de dire si le chrysotile, la crocidolite et l'amosite présentent un potentiel cancérigène différencié pour le poumon. Les expositions professionnelles se produisent dans des circonstances différentes et, à l'exception des mines et du broyage, on se trouve souvent en présence de mélanges. De plus, les comparaisons peuvent être faussées en raison de facteurs de risque mal connus (caractéristiques dimensionnelles des fibres et leurs répartitions, niveaux d'exposition, tabagisme, exposition aux silices cristallines ou à d'autres aérosols...) et possiblement différents.

Certains auteurs, dans un ré-examen récent de la question, concluent que les risques de cancer pulmonaire sont similaires, si on compare les expositions en nombre de fibres, pour le chrysotile, l'amosite et la crocidolite. « L'hypothèse amphiboles » ne semble actuellement devoir être retenue que pour ce qui se rapporte au mésothéliome.

3.1.2. Mésothéliome

Les études épidémiologiques montrent que l'apparition de mésothéliomes, et sans doute aussi de carcinomes pulmonaires, est plus fortement corrélée à la présence des amphiboles, crocidolite et amosite, qu'à celle du chrysotile. Il a été montré, depuis, que le chrysotile est nettement plus facilement éliminé du poumon humain que les autres formes. Il n'y a pas d'accord sur l'importance de la différence des risques. A l'extrême, on pourrait se demander si l'exposition au chrysotile n'entraîne qu'un risque négligeable de mésothéliome. Le nombre de cas diagnostiqués parmi les travailleurs des mines du Québec semble prouver le contraire, mais il a été avancé qu'ils pourraient être dus à la présence de trémolite ; celle-ci représente environ 1,5 % par rapport au chrysotile, mais elle constitue souvent une large proportion des fibres longues retrouvées dans les poumons à l'autopsie. Il n'est donc pas possible d'affirmer que le risque de mésothéliome est négligeable suite à l'exposition au chrysotile.

Un certain nombre d'experts estime que la probabilité d'un mésothéliome dû au chrysotile est faible à très faible, mais qu'elle augmente en cas de très fortes expositions (en principe maintenant disparues) ou d'expositions mixtes (présence d'amphiboles). A titre d'exemple, certains ont évalué les risques relatifs, en tenant compte de la clairance relativement rapide du chrysotile, dans l'ordre : 9,1 (crocidolite > 10 µm), 5,2 (amosite > 10 µm) et au plus 0,01 (chrysotile < 10 µm).

Des observations *post mortem* sur des personnes exposées et témoins ont montré que les fibres sont distribuées de façon très hétérogène dans la plèvre, et dirigées vers des points précis où elles se concentrent, pouvant atteindre là des concentrations égales ou supérieures à celles dans le parenchyme pulmonaire, avec des concentrations très faibles ou indétectables à quelques centimètres de distance. Le diamètre mesuré des fibres était de 0,19 µm, et plus de 60 % des fibres étaient de longueur inférieure à 5 µm (10 % de fibres de longueur supérieure à 8 µm).

3.2. Fibres minérales vitreuses artificielles

Les études épidémiologiques récentes les plus importantes pour évaluer le potentiel cancérigène éventuel des fibres de verre, de laine de roche ou de laitier ont été menées sur 21 967 travailleurs dans 13 usines de 7 pays d'Europe, et aux Etats-Unis sur 16 661 travailleurs dans 17 usines de production de laines de roche, laitier ou verre et de filament continu. Deux études de moindre dimension ont concerné 2 557 travailleurs d'une usine de laine de verre en Ontario, et 1 374 travailleurs de laine de verre en France. Une étude suédoise a porté sur 135 026 travailleurs du bâtiment exposés de façon intermittente à ces divers types de fibres. D'autres données se rapportent à des sous-cohortes.

3.2.1. Fibres de verre

Dans la cohorte des ouvriers de production de laine de verre située aux Etats-Unis, l'exposition moyenne aux fibres de verre de diamètres inférieurs à 3 µm a été estimée à environ 0,03 f.ml⁻¹ (soit 30 f.l⁻¹). Cette valeur cache en fait de grandes disparités selon les situations.

Les taux de mortalité par cancer des voies respiratoires étaient augmentés de façon non significative par rapport aux taux de mortalité nationaux ou locaux. Pour les ouvriers dont la première exposition remontait à plus de 20 ans, aucune mortalité significative par cancer des voies respiratoires n'a été rapportée pour les usines ne fabriquant que de la fibre de verre, mais elle était significativement augmentée pour les ouvriers des usines fabriquant à la fois de la laine de verre et des filaments continus. Une tendance croissante mais non significative, en fonction du temps passé depuis la première exposition, a été rapportée pour les ouvriers de la laine de verre exposés au moins une fois aux fibres de petits diamètres. Aucune relation n'a été mise en évidence en fonction de la durée de l'exposition ou de l'exposition cumulée.

Dans la sous-cohorte européenne des ouvriers produisant des fibres de verre, les taux globaux de mortalité par cancer pulmonaire étaient augmentés de façon significative par rapport aux taux nationaux, mais non par rapport aux taux locaux. Pour les ouvriers de la laine de verre exposés pour la première fois plus de 20 ans auparavant, la mortalité par cancer pulmonaire était également augmentée. Aucune tendance significative n'a été observée en fonction du temps depuis la première exposition ou en fonction des phases techniques du développement industriel.

On a observé dans l'étude canadienne une mortalité significativement augmentée par cancer pulmonaire chez les travailleurs de la laine de verre. Cependant, il n'y avait aucune relation avec la durée d'emploi ou le temps passé depuis la première exposition.

On n'a trouvé aucune relation apparente entre la mortalité par maladies non cancéreuses des voies respiratoires et l'exposition aux fibres de verre.

Dans leur conclusion après actualisation des données relatives aux cohortes européennes, BOFFETTA et coll. [3] concluent que, pour les fibres de verre, « le relatif excès des cancers pulmonaires est nettement réduit après application aux taux nationaux de mortalité de facteurs d'ajustement locaux, et ne présente pas de relation avec la durée d'emploi ni le temps depuis la première embauche ».

3.2.2. Laines de roche et de laitier

Dans une étude transversale de la cohorte des ouvriers exposés aux laines de roche et de laitier, une augmentation significative des cancers des voies respiratoires a été rapportée, après contrôle portant sur la consommation de tabac. L'exposition moyenne des ouvriers étudiés aux Etats-Unis a été estimée à 0,353 f.ml⁻¹ pour les fibres de diamètre inférieur à 3 µm.

Dans la cohorte européenne, un accroissement non significatif de mortalité par cancer pulmonaire a été observé dans la cohorte exposée à la laine minérale, que ce soit par rapport aux taux de mortalité locaux ou nationaux. Pour les ouvriers de la laine minérale exposés pour la première fois 20 ans ou plus auparavant, un accroissement non significatif de mortalité par cancer pulmonaire a été trouvé. Cependant, dans les phases de production anciennes et intermédiaires (où l'exposition a probablement été plus marquée), un accroissement significatif de mortalité par cancers pulmonaires a été rapporté pour les ouvriers exposés pour la première fois 20 ans ou plus auparavant.

L'actualisation récente effectuée par le CIRC [1] révèle des SMR, pour les cancers broncho-pulmonaires et sur la base de taux nationaux, de 127 à 137, statistiquement significatifs, pour la cohorte globale et pour les travailleurs exposés aux laines de verre ou de roche ; la significativité n'est pas atteinte pour le filament continu. Sur la base de taux locaux, les SMR (Standardized Mortality Ratio) sont, pour la laine de verre, de 112 (statistiquement non significatif) et, pour la laine de roche, de 139 (statistiquement significatif). Pour cette dernière, le test de tendance en fonction de la durée d'emploi est à la limite de la significativité ($p = 0,05$).

Selon les auteurs, « plusieurs caractéristiques sont compatibles avec une relation causale entre l'emploi dans les FMA et un risque accru d'incidence et de mortalité par cancer pulmonaire. L'accroissement de ces deux paramètres peut difficilement être expliqué par le seul hasard ». Ils concluent que « des données complémentaires sont nécessaires pour conclure plus clairement sur l'existence d'un lien causal possible entre l'exposition aux laines de roche et de laitier et le cancer pulmonaire (...), en réalisant maintenant une analyse cas-témoins, dans la sous-cohorte laines de roche et de laitier, traitant les questions du facteur de confusion par le tabagisme et des autres expositions professionnelles, et évaluant de façon aussi précise que possible les expositions individuelles passées aux fibres alvéolaires ».

3.2.3. Fibres céramiques réfractaires (FCR)

Aucune étude épidémiologique de mortalité des ouvriers exposés aux FCR n'a été réalisée ; on ne peut donc entreprendre actuellement aucune évaluation de la mortalité dans ce domaine.

Une étude de morbidité a été menée sur 708 ouvriers répartis dans 7 usines (France, Grande-Bretagne, Allemagne) ; le temps moyen d'emploi était de 10,2 années et l'exposition cumulée s'étendait de 0 à 23 f.ans.ml⁻¹ (fibres par millilitre x nombre d'années). L'étude conclut, après ajustements pour tenir compte des facteurs de confusion, à un probable effet des fibres céramiques sur la fonction respiratoire des fumeurs et anciens fumeurs.

Une étude portant sur 5 usines américaines productrices de fibres céramiques a trouvé une association statistiquement significative ($p = 0,002$ après correction relative à l'exposition à l'amiante) entre le temps passé depuis l'emploi en production et la présence de plaques pleurales. Le risque était lié à la durée.

3.2.4. Globalement

Selon DOUGLAS [4], les principales conclusions sont les suivantes :

- aucun risque de mésothéliome ou de fibrose n'a été objectivé sous forme de SMR ou SIR (Standardized Incidence Ratio) élevés dans les cohortes exposées aux fibres de verre, roche ou laitier ;

- pour le cancer pulmonaire, les SMR étaient comparables dans les différentes études (160 à 264 pour la crocidolite et, pour les fibres de roche ou laitier, 125 à 257 dans les études européennes et 131 à 158 dans les études américaines). Les auteurs des études sur les fibres de verre, de roche ou de laitier affirment que les différences tabagiques entre exposés et témoins n'expliquent pas l'excès des cancers. Pour leur part, les auteurs des études sur la crocidolite ont avancé qu'une partie de l'excès mesuré de cancers pourrait être attribuée à un tabagisme marqué dans leur cohorte ;

- les évaluations des doses cumulées n'ont pu être qu'approximatives, les doses réelles étant vraisemblablement surestimées pour les fibres de verre, de roche ou de laitier, et sous-estimées (d'un facteur qui pourrait atteindre 10) pour la crocidolite ;

- si on suppose valides les comparaisons entre études des SMR et des doses en nombre de fibres, les fibres de verre, de roche ou de laitier sont nettement plus cancérigènes pour le parenchyme pulmonaire que la crocidolite. Cette conclusion n'est pas cohérente avec ce que l'on sait des toxicités expérimentales comparées de ces fibres et de la crocidolite, des différences entre diamètres des fibres, et de l'absence de mésothéliomes et de pneumoconioses ;

- une explication plus rationnelle de l'élévation des SMR pour les cohortes exposées aux fibres de verre, de roche ou de laitier, serait que les habitudes tabagiques, le faible statut socio-économique des travailleurs dans les années 40-50, et un environnement de travail généralement médiocre et pollué se sont combinés pour provoquer ces excès, plutôt que les fibres par elles-mêmes.

Le même DOUGLAS [4] estime de plus que la complexité des facteurs de confusion possibles rend très peu probable une meilleure exploitation des informations relatives aux cohortes exposées aux Etats-Unis et en Europe.

3.2.5. Controverses actuelles

Des publications récentes [5, 6] tendent à montrer qu'une correction plus fine du tabagisme ramènerait les SMR à des niveaux voisins de ceux des populations témoins. Cependant :

- les corrections proposées [5] sont fondées sur des données incomplètes du tabagisme des populations locales et nationales (et non celles de la cohorte réelle, mal connues) ;

- le risque d'erreur de classification entre fumeurs et non-fumeurs reste présent (la stratification sur le paramètre tabagisme est hors d'atteinte) ;

- les SMR calculés restent très sensibles à toute modification de cette classification, ou à l'exclusion de cas positifs d'étiologie incertaine.

Il est possible, malgré les efforts d'évaluation plus objective et plus fine de ce facteur de confusion entrepris ou à entreprendre, qu'on en reste finalement à l'appréciation de DOUGLAS rappelée ci-dessus.

MARSH [6] a ré-examiné deux sous-cohortes exposées aux laines de roche et de laitier. Un total de 1 018 décès a été enregistré. Pour la première cohorte (3 035 ouvriers) est observé un SMR de 117 (71 décès ; non statistiquement significatif au risque de 5 %) ; une analyse statistique détaillée révèle l'hétérogénéité des risques entre usines, mais aucune association statistiquement significative avec la race, l'âge à l'embauche, le temps passé depuis le premier emploi ou l'ancienneté.

Pour la seconde (443 ouvriers), le SMR « toutes causes » est de 102 (210 décès ; taux de mortalité locaux). Il y a un excès statistiquement significatif de cancers du système respiratoire. Il n'y a pas de relation apparente avec l'ancienneté, mais un gradient positif est observé avec le temps passé depuis le premier emploi. Un excès statistiquement significatif (SMR = 153 ; 20 décès) est observé pour les maladies respiratoires non cancéreuses, mais il n'apparaît pas lié à l'ancienneté ou au temps passé depuis le premier emploi. Les excès constatés dans cette cohorte pourraient être associés à l'utilisation connue de l'amiante dans l'usine ; aucun mésothéliome n'a cependant été relevé.

4. AUTRES ETUDES

Des travaux in vitro ont montré que la cytotoxicité et la génotoxicité des fibres vitreuses et des fibres d'amiante sont fortement liées à leur longueur. Ces résultats sont recoupés par les essais d'injection intracavitaire de STANTON et coll. et de POTT et son équipe. Ces travaux montrent que, quel que soit le minéral (amiante ou autres minéraux fibreux), l'apparition de mésothéliomes après injection intrapleurale ou intrapéritonéale est liée au nombre des fibres de longueur supérieure à 8 µm et de diamètre inférieur à 0,25 µm. Dans leurs conditions expérimentales, les fibres de verre étaient presque aussi fortement cancérigènes que celles d'amiante, et aucun minéral comportant des fibres longues et fines ne donnait de résultat négatif.

Le principal avantage des méthodes d'instillation ou d'implantation est la possibilité d'administrer relativement facilement et à peu de frais une quantité donnée de fibres à un emplacement défini. L'inconvénient est qu'on délivre en une seule fois une dose importante, ce qui n'a rien à voir avec l'arrivée progressive de fibres au poumon par voie inhalatoire, même dans les conditions les plus caricaturales. Les mécanismes normaux de défense et d'élimination sont court-circuités. De plus, des fibres sont déposées en un lieu où elles n'auraient pas pu toutes parvenir dans les conditions normales (après sélection aérodynamique et par impaction).

Ces techniques d'injection amplifient la réponse tissulaire aux fibres, en excédant ou court-circuitant les mécanismes de clairance. C'est pourquoi il est important de vérifier si fibrose et néoplasmes dépendent des mêmes paramètres lorsque les fibres sont inhalées.

5. CONCLUSIONS

L'épidémiologie a montré que l'amiante est pour l'homme un cancérigène pulmonaire. Il n'en est pas ainsi pour les fibres minérales artificielles, mais on peut penser, en particulier pour les fibres céramiques réfractaires (silice – alumine) biopersistantes, que le caractère relativement récent de la production industrielle ne permet pas un recul suffisant pour en juger valablement.

Certains facteurs influencent la réponse à l'effet cancérigène, notamment l'usage du tabac (synergie), mais aussi l'inhalation en grande quantité d'autres aérosols alvéolaires insolubles, même non connus pour leur pathogénicité. Pour ce qui est du mésothéliome, la fibre doit être transportée à la plèvre et il est vraisemblable qu'interviennent des facteurs autres que sa géométrie, par exemple des propriétés de surface, comme le montre le cas particulier de l'ériomite.

D'une façon générale, les fibres minérales artificielles (FMA) n'ont pas toutes leurs propriétés en commun avec l'amiante, en particulier :

- leurs diamètres géométriques sont plus importants que ceux des fibres d'amiante (à l'exception de ce qu'on appelle les micro-fibres, actuellement peu diffusées en Europe). Il en résulte, à concentration massique identique, un moindre nombre de FMA dans l'atmosphère que de fibres d'amiante ;
- leur biopersistence en milieu pulmonaire est plus faible, surtout comparée à celles du crocidolite et de l'amosite (le chrysotile est la variété d'amiante la moins biopersistante) ;
- à la différence de l'amiante (amphiboles surtout), les fibres les plus fines et les plus longues, que l'on pense les plus dangereuses, subissent en milieu pulmonaire des cassures transversales et disparaissent ;

TABLEAU II

Toxicités comparées, par ordre décroissant de risque cancérigène, de l'amiante et des fibres minérales vitreuses artificielles

Fibres inhalables	Appréciation qualitative du risque
Amiante	Provoque chez l'homme des cancers pulmonaires et de la plèvre, des fibroses pulmonaires, ainsi que des plaques pleurales.
Fibres céramiques réfractaires	Provoquent chez l'animal d'expérience des cancers pulmonaires et de la plèvre, et des fibroses pulmonaires. Des plaques pleurales ont été rapportées chez l'homme.
Laines de roche	Provoquent des fibroses pulmonaires chez l'animal d'expérience, aux forts niveaux d'exposition.
Laines de laitier, laines de verre	Ne provoquent pas de fibrose pulmonaire chez l'animal d'expérience, même à forte exposition.

- elles ne peuvent pas se séparer longitudinalement en fibres de plus petits diamètres (comme le fait le chrysotile) ;
- elles ne sont pas cristallines.

C'est en raison de ces différences que l'on peut envisager la substitution de FMA à l'amiante, chaque fois que c'est techniquement possible. Les décisions concrètes restent souvent très difficiles à prendre notamment en raison :

- des propriétés toxicologiques a priori défavorables des fibres biopersistantes ;
- de l'évolution technique rapide de leurs formulations et propriétés ;
- de la méconnaissance des mécanismes extrêmement complexes de la cancérogenèse par les fibres ;
- de l'intrication profonde des facteurs techniques et économiques ;
- de l'hétérogénéité de nos connaissances des propriétés des divers types de fibres industrielles.

Pour répondre, malgré toutes ces difficultés, aux souhaits de personnes du terrain d'une présentation simple qui puisse aider à orienter des choix, on peut, à partir de l'ensemble des données actuelles, proposer un tableau positionnant qualitativement, par ordre de toxicités décroissantes, les fibres d'amiante et les fibres minérales vitreuses artificielles (tableau II).

Il est clair actuellement que les facteurs de dimension, biopersistence et propriétés de surface des fibres jouent un rôle important dans les mécanismes menant aux fibroses et aux tumeurs pulmonaires.

D'un point de vue préventif, il semble avisé de suivre et d'approfondir, au besoin par des programmes scientifiques volontaires, les connaissances relatives à toutes les fibres utilisées à l'échelle industrielle.

ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES (*)

- [1] DAVIS J.M.G., JONES A.D. – Comparisons of the pathogenicity of long and short fibres of chrysotile asbestos in rats. *British Journal of Experimental Pathology*, 1988, 69, pp. 717-737.
- [2] WAGNER J.C. – Mesotheliomas in man and experimental animals, in « Mechanisms in fibre carcinogenesis ». In : BROWN R.C., HOSKINS J.A., JOHNSON N.F. – NATO ASI Series – Life sciences, vol. 223. New York, Plenum press, 1991, pp. 45-49.
- [3] BOFFETTA P., SARACCI R., FERRO G. et coll. – IARC historical cohort study of man-made vitreous fibre production workers in seven european countries. Extension of the mortality and cancer incidence follow-up until 1990. OMS/CIRC. Rapport interne du CIRC n° 95/003, novembre 1995.
- [4] DOUGLAS D. – Health effects of insulation wools (rock/slag wool and glass wool) and future research needs, in « Mechanisms in fibre carcinogenesis ». In : BROWN R.C., HOSKINS J.A., JOHNSON N.F. – NATO ASI Series – Life sciences, vol. 223. New York, Plenum press, 1991, pp. 17-27.
- [5] CHIAZZE L., WATKINS D.K., FRYAR C. – Adjustment for the confounding effect of cigarette smoking in an historical cohort mortality study of workers in a fiberglass manufacturing facility. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 1995, 37, pp. 744-748.
- [6] MARSH G.M., STONE R.A., YOUK A. et coll. – Mortality among United States rock wool and slag wool workers : 1989 update. *Journal of Occupational Health and Safety (Aust NZ)*, 1996, 12, 3, pp. 297-312.
- [7] HODGSON A.A. – Industrial fibres : a technical and commercial review. *Annals of Occupational Hygiene*, 1993, 37, 2, pp. 203-210.
- [8] SEARL A. – A review of the durability of inhaled fibres and options for the design of safer fibres. *Annals of Occupational Hygiene*, 1994, 38, 6, pp. 839-855.
- [9] EASTES W., HADLEY J.G. – A mathematical model of fiber carcinogenicity and fibrosis in inhalation and intraperitoneal experiments in rats. *Inhalation Toxicology*, 1996, 8, pp. 323-343.
- [10] BROCHARD P., PAIRON J.-C., BIGNON J. – The occupational physician's point of view : the model of man-made vitreous fibers. *Environmental Health Perspectives*, 1994, 102 (suppl. 5), pp. 31-36.

(*) Le rapport remis au ministère du Travail cite soixante et une références.

ANNEXE A

Classification et diamètre des fibres – Eléments d'appréciation

1. La pénétration des fibres dans les voies pulmonaires, première condition pour qu'elles soient susceptibles d'y exercer un effet nocif, dépend étroitement de leur diamètre. Les fibres dont le diamètre aérodynamique est supérieur à 10 µm (soit environ 3,3 µm de diamètre géométrique) ont une probabilité négligeable d'atteindre le poumon profond humain (zones non ciliées et alvéoles). Rappelons que le diamètre maximal de comptage des fibres au microscope, fixé par convention, est de 3 µm (et la longueur minimale 5 µm). Un critère fondé sur l'absence ou la minimisation du pourcentage de fibres de diamètre inférieur ou égal à 3 µm (par exemple inférieur à 0,1 % en masse – ou, mieux, en nombre –

dans le produit brut de fabrication) n'est actuellement pas opératoire : aucun produit naturel ou artificiel (à l'exception des filaments continus) ne satisfait à cette condition.

2. Il est clair que plus le diamètre d'une fibre est important, plus la probabilité qu'elle soit inhalée et déposée dans les bronches ou le poumon profond est faible, à écart-type égal. De même, plus le diamètre nominal de fabrication est important, moins la quantité d'aérosol inhalable sur le lieu de travail sera, en principe, importante. C'est l'argumentation de base de la documentation présentée par la profession.

ANNEXE B

Schéma possible de classification des fibres

Le diagramme présenté dans la figure 2, qui n'est qu'une possibilité parmi d'autres, a été évoqué en séance :

– le schéma proposé est, par principe, applicable à tous les types de fibres. Ceci signifie qu'il impose l'élaboration d'un ensemble minimal de données pour chacun de ces types, permettant d'améliorer les connaissances de base et les possibilités de comparaisons entre fibres ;

– l'essai de biopersistance pulmonaire préconisé est celui exposant des rats (modèle animal réalisant un compromis validité/coût acceptable) par voie inhalatoire (et non par instillation intratrachéale). Les conditions de pénétration et la répartition des fibres dans les poumons sont ainsi plus proches de la réalité, ainsi que celles de clairance et de lixiviation ou de phagocytose ;

– l'essai par injection intracavitaire peut être retenu ou non, en raison de ses avantages et inconvénients. Il gagnerait à être mieux défini dans son mode opératoire (quantités maximales injectables, nombre maximal d'injections, granulométrie des poussières injectées) comme dans les modalités de l'interprétation de ses résultats ;

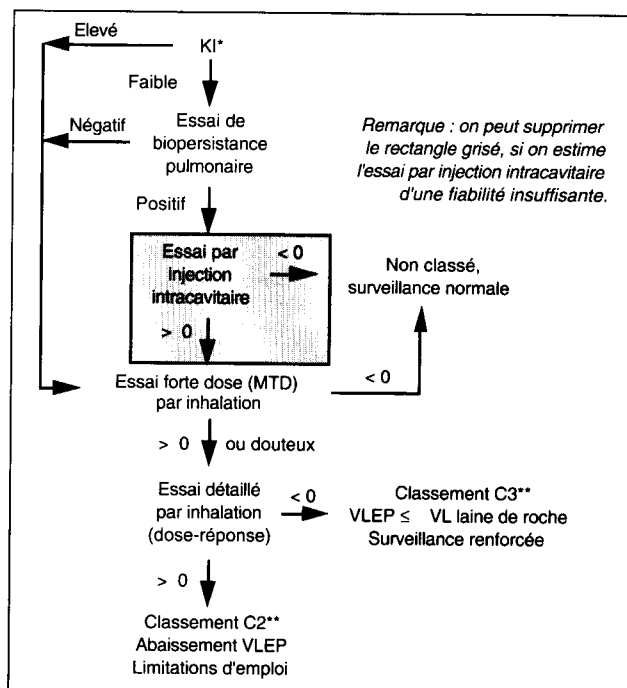


Fig. 2. Schéma d'études possibles pour une classification des fibres

*KI : voir annexe D – Composition chimique

**C2, C3 : Suivant le classement réglementaire établi par la Commission des communautés européennes, catégories C2 = substances devant être assimilées à des substances cancérogènes pour l'homme, C3 = substances préoccupantes en raison d'effets cancérogènes possibles.

– l'essai forte dose par inhalation a pour but de préciser la nature du risque à la dose maximale tolérable par l'animal. L'inconvénient principal est que la notion de dose maximale tolérable (MTD) fait encore, dans le domaine des aérosols, l'objet de controverses. Pour être considérés comme négatifs, les résultats doivent correspondre à une toxicité animale inférieure ou égale à celle de la laine de verre dans les mêmes conditions. Le fait qu'un résultat soit négatif ne justifie pas en principe la non-fixation de valeurs limites d'exposition professionnelle.

Ces réflexions sont en réalité relatives à la définition d'une stratégie d'essais toxicologiques sur les fibres.

Les anglais (Health and Safety Executive) ont proposé un autre schéma (fig. 3).

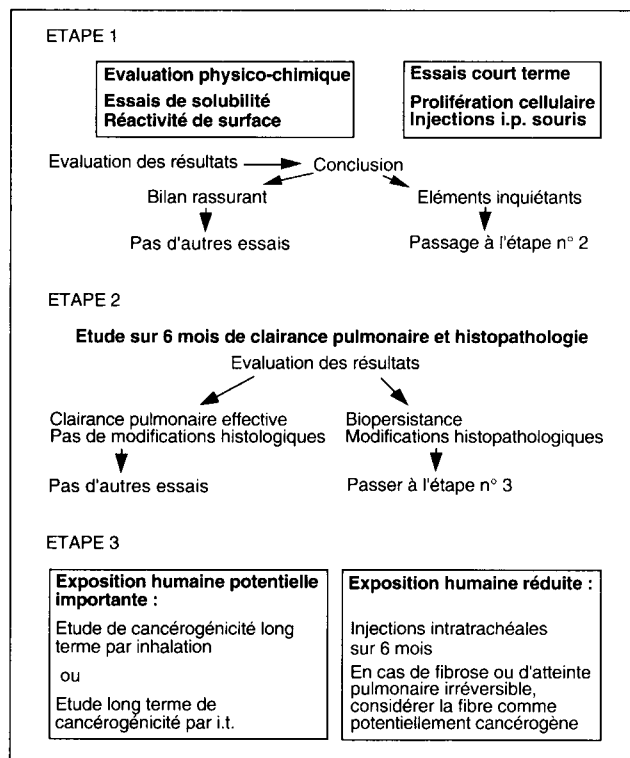


Fig. 3. Stratégie d'essais toxicologiques de fibres selon le Health and Safety Executive (HSE)

ANNEXE C

Utilisations de l'amiante, de fibres céramiques et de fibres de substitution

En principe, l'amiante devrait être remplacé, dans l'élaboration de matériaux, par d'autres produits moins dangereux (fibres ou non) chaque fois que techniquement possible. Ceci revient à faire la liste complète et l'examen, au cas par cas, des applications actuelles de l'amiante – en commençant par les plus importantes – et à décider, en fonction des propriétés de l'amiante indispensables à la qualité technique du produit fini, si il peut être remplacé, par quel matériau et dans quelles conditions. Cela requiert la connaissance des propriétés des fibres de substitution potentielle telles que : tenue en température, conductivité thermique en fonction du diamètre, densité moyenne, résistance chimique, répartition dimensionnelle des longueurs et diamètres, coût, données toxicologiques aussi complètes que possible... Il n'y a pas qu'un travail d'information et d'appréciation à réaliser, mais aussi de vérifications techniques (sans parler des questions économiques) : il ne s'agit pas de découvrir, une fois qu'il est trop tard, que

la qualité technique du produit, ou le risque qu'il présente, est inacceptable. D'où l'importance, entre autres, d'un recensement des travaux qui ont été très vraisemblablement effectués dans les Caisses régionales d'assurance maladie, par de gros groupes industriels, ou encore à l'étranger, notamment en Allemagne.

Il ne faudrait pas que le matériau de substitution envisagé se révèle, dans 20 ou 30 années, aussi toxique que l'amiante. D'où, et c'est le minimum que l'on puisse faire dans un premier temps (à défaut d'une garantie absolue, hors d'atteinte), la nécessité d'études toxicologiques et d'une classification a priori.

HODGSON [7] donne des orientations générales, à titre indicatif, sur les matériaux possibles de substitution aux fibres d'amiante (tableaux III, IV et V).

TABLEAU III
Matériaux éventuels de substitution à l'amiante – Propriétés

Qualité recherchée	Résistance thermique	Capacité de renforcement	Résistance chimique
Bonne	(au-delà de 400 °C) Fibres réfractaires Laines minérales Tous les minéraux Fibres d'acier	Fibres : – d'aramide – de carbone – de polytétrafluoroéthylène – de verre – d'acier	PBI Polyacrylonitrile Polytétrafluoroéthylène Alcool polyvinyle Polypropylène Fibres de carbone Fibres réfractaires (sauf en milieu alcalin) La majorité des minéraux
Modérée	(200 à 400 °C) Fibres d'aramide Alcool polyvinyle Polytétrafluoroéthylène PBI Polyacrylonitrile Fibres de carbone Fibres de verre	Fibres : – de cellulose – de polypropylène – de polyacrylonitrile – réfractaires Laines minérales	Fibres : – d'aramide – d'acier
Faible	Fibres cellulosiques Polypropylène	Tous les minéraux Polytétrafluoroéthylène	Fibres cellulosiques

On peut compléter ces données avec le tableau VI, tiré des données fournies par l'European Ceramic Fibres Industry Association (ECFIA).

Selon l'ECFIA, aucune fibre de substitution éventuelle ne combine l'ensemble des propriétés avantageuses des FCR ; la plupart sont plus coûteuses et de mise en œuvre plus difficile.

TABLEAU IV
Coûts et disponibilité industrielle de matériaux de substitution éventuelle à l'amiante

Prix à l'achat			Niveau de production industrielle
Faible	Laines minérales Laines de verre Cellulose Fibres végétales Perlite Dolomite Mica Vermiculite Talc	Wollastonite Attapulgite Sépiolite Filament continu Polypropylène Alcool polyvinylique Aluminosilicates Filaments d'acier	Sépiolite Alcool polyvinylique Polytétrafluoroéthylène Fibres réfractaires Fibres métalliques Aramide Fibres de carbone Mica Wollastonite
Moyen	Filaments continus Polytétrafluoroéthylène		Attapulgite Vermiculite Filament continu
Elevé	Fibres d'aramide Fibres de carbone Fibres d'alumine Fibres de silice		Perlite Diatomite Talc Laine de verre Laines minérales (*) Polypropylène Cellulose

(*) Plus de 5 millions de tonnes.

Tonnages produits en France (données 1995 communiquées par le FILMM – Syndicat national des fabricants d'isolants en laines minérales manufacturées) : laines de roche/laitier : 252 000 tonnes ; laines de verre : 135 000 tonnes.

TABLEAU V
Fibres et matériaux particuliers utilisés
dans quelques produits importants en remplacement de l'amiante
(Ce relevé ne se limite pas à ce qui est pratiqué dans le Royaume-Uni)

Types de produits	Constituants fibreux et particuliers
Ciment renforcé par des fibres	Fibres de verre résistant aux bases, fibres de cellulose, fibres d'acier ; polypropylène fibrillé ; fibres de polyéthylène, d'alcool polyvinylique ou de polyacrylonitrile et/ou fibres de cellulose ; wollastonite, micas, sépiolite.
Panneaux isolants internes	Fibres de verre résistant aux bases, fibres de cellulose ; fibres de bois ; terres de diatomées, wollastonite, perlite, vermiculite, halloysite.
Matériaux isolants	Laines de verre, laines minérales, fibres et laines de céramique ; perlite, vermiculite, xonotlite, titanate de potassium.
Textiles hautes performances et thermorésistants	Fibres de verre, fibres de céramique ; fibres d'aramide ; fibres de carbone.

Types de produits	Constituants fibreux et particuliers
Matériaux de friction	Fibres et bourre d'aramide ; fibres d'acier, fibres de verre, fibres de cellulose, fibres de céramique, fibres de carbone ; mica, attapulgite, wollastonite, terres de diatomées, alumine, silice.
Plastiques renforcés	Fibres de verre, laines minérales ; aramide, nylon, rayonne et fibres de carbone ; fibres végétales (jute, lin, sisal, bambou) ; silice, roche broyée, mica broyé, talc, titanate de potassium, carbure de silicium.
Joints et garnitures	Bourre d'aramide ; fibres de verre, fibres de céramique, fibres de polytétrafluoroéthylène, fibres de carbone ; fibres végétales.

TABLEAU VI
Fibres céramiques réfractaires et fibres alternatives éventuelles
(D'après le rapport « Description and characterisation of the ceramic fibres industry of the European Union », octobre 1995)

Avantages globaux des fibres céramiques réfractaires	Fibres alternatives éventuelles	Observations
- T 1 000 – 1 460 °C - Faible conductivité thermique - Très faible capacité calorifique - Faible densité - Flexibilité, façonnage aisé - Faible coût unitaire - Bonne résistance thermique et chimique - Bon isolant phonique et contre le feu	Silice fondue (fibres de quartz)	T ≤ 1 050 °C ; d = 9 – 15 µm Renforcement (usages militaires)
	Fibres de silice lixiviée	> 96 % de silice. T ≤ 980 °C. Isolants thermiques et industriels.
	Fibres d'alumine	> 72 % Al ₂ O ₃ ; T = 1 480 à 1 600 °C ; souvent en mélanges (cassantes)
	Fibres silice-alumine-bore	T = 1 370 à 1 650 °C (en pointe) ; textiles, tissus d = 7 – 13 mm.
	Fibres de zircone	> 89 % ZrO ₂ , 8 % Y ₂ O ₃ (stabilisant) T jusqu'à 1 925 °C Très inertes chimiquement
	Terre à feu isolante	Mélanges SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO. T 1 100 – 1 650 °C Isolation thermique de fours Bonne résistance mécanique

T : température d'utilisation possible.

ANNEXE D

Biopersistance et indices connexes

L'essai de biopersistance en milieu pulmonaire, après exposition par inhalation, présente une valeur prédictive moindre que celui de toxicité par inhalation à long terme (deux années sur le rat à 3 niveaux de dose, par exemple). Il a l'avantage de pouvoir être pratiqué dans des délais plus acceptables et d'être moins coûteux. Il donne une idée relativement réaliste de la durabilité des fibres examinées en milieu pulmonaire. Il est généralement admis que cette durabilité correspond à un facteur de risque supplémentaire pour le cancer pulmonaire ou le mésothéliome.

Ces essais donnent des indications qu'on ne sait pas toujours bien interpréter en termes d'évaluations de risque pour l'homme, notamment en raison des écarts par rapport à la réalité physiologique humaine, et de conditions expérimentales diversifiées. Il faut d'ailleurs rappeler que l'existence d'un lien direct entre biopersistance pulmonaire et risque cancérigène pour l'homme n'est pas démontrée dans le cas général (cf. l'exemple des mineurs de charbon).

Il est néanmoins estimé que plus courte est la durée de demi-vie, plus limités sont les risques d'induction de cancer [8, 9]. Les données permettent de se faire une idée de la biopersistance comparée de diverses fibres. Un travail de normalisation définissant les conditions de réalisation et d'interprétation des essais est en cours.

Les principales questions soulevées par ce paramètre sont :

- existe-t-il un seuil en dessous duquel la biopersistance est insuffisante pour initier une réaction irréversible ?
- quel modèle expérimental recommander pour évaluer la biopersistance ?
- quels sont les paramètres qui permettent de prédire la biopersistance (dimensions, composition chimique, structure polyatomique, caractéristiques de surface) [10] ?

Composition chimique

Plusieurs indices sont proposés pour refléter un risque possible à partir de données conventionnelles de composition chimique (pourcentage en masse des éléments principaux, exprimés en oxydes).

Le KNB est proposé par la profession :

$$\text{KNB (index EURIMA)} = [\text{Na}_2\text{O}] + [\text{CaO}] + [\text{K}_2\text{O}] + [\text{MgO}]$$

Le KI est proposé par les allemands :

$$\text{KI (index AGS allemand)} = \text{KNB} + [\text{BaO}] + [\text{B}_2\text{O}_3] - 2 [\text{Al}_2\text{O}_3]$$

La « solubilité » de la fibre est représentée, par hypothèse, par ces indices (tableau VII). Ainsi, un KI élevé (par exemple supérieur à 40) correspond à une faible biopersistance et donc, toujours par hypothèse, à un faible risque cancérigène.

TABLEAU VII

**Essai indicatif de classement des FMA
en fonction de leur solubilité in vitro et de leur biopersistance**
(Exemples chiffrés repris d'un document
communiqué par M. BIGNON)

Biopersistance	Remarques et exemples
(1) Très biopersistantes, très peu biosolubles, $T_{1/2} > 60$ j	Fibres hautement réfractaires $KI = -90$; $Kd < 6$; $KNB < 2$ Exemple : RCF1
(2) Biopersistantes, peu biosolubles, $30 \text{ j} < T_{1/2} < 60 \text{ j}$	Fibres pour le renfort ; elles ont souvent un diamètre supérieur à $6 \mu\text{m}$ $KI \# 2$; $Kd \# 8$; $KNB \# 3$ Exemple : verre E
	Fibres spéciales pour la filtration $KI \# 20$; $Kd \# 11$; $KNB \# 16$ Exemple : fibre 475 de Schuller
(3) Peu biopersistantes, biosolubles, $15 \text{ j} < T_{1/2} < 30 \text{ j}$	Fibres pour laines d'isolation $5 < KI < 5$; $6 < Kd < 30$; $KNB > 18$ Exemples : laine de roche, MMVF 21, basalte
(4) Très biosolubles, non biopersistantes, $T_{1/2} < 15 \text{ j}$	Fibres pour laines d'isolation $20 < KI < 30$; $30 < Kd < 300$; $KNB > 18$ Exemples : Laine de laitier, laine de verre, MMVF 10, MMVF 11, MMVF 22
	Fibres nouvelles pour isolation $KI > 30$; $Kd > 300$; $KNB > 18$ Exemples : CM 25, TM 34 [HTX]

Kd = Coefficient de dissolution in vitro en $\text{ng.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$, $\text{pH} = 7,4$
 $T_{1/2}$ = Temps de demi-vie des fibres de longueur $> 5 \mu\text{m}$ (OMS)

Ce type d'approche a été critiqué et ne fournirait pas un critère discriminant robuste. Tout au plus, selon les auteurs, ce genre de critère pourrait-il servir à une différenciation entre fibres d'une même famille, mais il ne peut être général et absolu.

Quoiqu'il en soit, cette approche doit être complétée par des tests plus représentatifs du risque toxicologique réel. De ce point de vue, la biopersistance en milieu pulmonaire peut être considérée comme prenant en compte l'influence de la solubilité des fibres de façon globale et plus réaliste.